Dr. *der Nat.* Poerbondono, S.T., M.M.
Ir. Eka Djunasjah, M.T.

SURVEI HIDROGRAFI

refika ADITAMA

Dr. *der Nat.* Poerbandono, S.T., M.M.
Ir. Eka Djunarsjah, M.T.

Survei Hidrografi

dengan kontribusi:
Ir. Samsul Bachri, M.Eng., Ph.D.
Ir. Hasanuddin Z. Abidin, M.Sc., Ph.D.
Ir. Irdam Adil, M.T.

refika
ADITAMA

RF. TEK. 11. 01. 2005

Dr. der Nat. Poerbandono, S.T., M.M. & Ir. Eka Djunarsjah, M.T.
Survei Hidrografi

Editor : Rose Herlina, S.Si.
Setting : Teddy Soleh Susandi
Desain Sampul : Iman Taufik, B.A.

Diterbitkan & dicetak oleh PT. Refika Aditama

Jl. Mengger Girang No. 98, Bandung 40254
Telp. (022) 5205985, Fax. (022) 5205984
e-mail: refika1@rad.net.id
Anggota IKAPI

Cetakan Pertama: Maret 2005

ISBN 979-3304-24-3

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang.
Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini
TANPA IZIN TERTULIS dari penerbit.

Sambutan

Hidrografi sebagai suatu ilmu pada awalnya difokuskan untuk menunjang navigasi kapal-kapal di laut. Sejalan dengan perkembangan teknologi serta meningkatnya kebutuhan manusia yang berkembang dengan pesatnya serta setelah beberapa perguruan tinggi terkenal mengantisipasi perkembangan tersebut dengan memasukkan hidrografi sebagai mata kuliah, ilmu hidrografi menjadi disiplin yang mulai dipelajari secara intensif dan ilmiah pada suatu program studi. Departemen Teknik Geodesi, Institut Teknologi Bandung, sebagai pelopor pendidikan geodesi di Indonesia, telah mulai mengembangkan ilmu hidrografi sejak tahun 1982.

Indonesia sebagai salah satu negara maritim yang besar, sudah sepantasnyalah ikut berperan serta dalam pengembangan hidrografi tersebut, terutama dalam bidang pendidikan untuk menghasilkan sumberdaya manusia yang akan mengelola wilayah perairan kita yang sangat luas ini. Sayangnya, literatur yang tersedia untuk mempelajari serta mengembangkan ilmu hidrografi tersebut sangat terbatas. Kekurangan literatur hidrografi itu tidak hanya terasa di Indonesia saja, akan tetapi juga di luar negeri. Oleh sebab itu, penerbitan buku hidrografi yang sederhana ini, minimal akan merupakan bacaan berharga bagi mahasiswa serta siapa saja yang berminat dalam bidang hidrografi untuk mempelajari serta menambah wawasannya. Selain itu, mudah-mudahan buku hidrografi ini dapat menjadi pancingan bagi ilmuwan-ilmuwan lain untuk membahas serta menulis, baik dalam bentuk makalah maupun buku mengenai hidrografi.

Para kontributor tulisan-tulisan dalam buku ini, terutama upaya Dr. Poerbandono sebagai penulis utama buku ini, yang telah berusaha dan bekerja keras dalam mewujudkan buku ini, patut kita hargai. Mudah-mudahan

buku ini dapat memberikan sumbangan dalam pengembangan hidrografi di Indonesia.

Bandung, Januari 2005

Dr.-Ing. Ir. Sjamsir Mira
Dosen di Departemen Teknik Geodesi ITB (1962-2004),
Dosen Tamu di Institut Teknologi Kebangsaan Malaysia (1972-1975),
Guru Besar ITB (1981-2004),
Pendiri (1982) dan Ketua KK Hidrografi (1982-2004),
Anggota *Advisory Board* IHO (1985-1990),
Anggota *Editorial Advisory Board* HydroINTERNATIONAL (1997-2002),
Pendiri (1993) dan Ketua Pusat Penelitian Kelautan ITB (1993-1999).

Pengantar Penulis

Terminologi hidrografi telah bergeser dan berkembang dari aktivitas penunjang navigasi laut (survei dan pemetaan laut) dan survei untuk industri lepas pantai (survei seismik dan batimetri laut dalam) menjadi disiplin ilmu yang mulai diselenggarakan sebagai program akademik setingkat magister di beberapa universitas di Inggris, Jerman, Amerika Serikat, Selandia Baru, Malaysia dan Indonesia. Sebagai sebuah disiplin, hidrografi meliputi beberapa topik yang berhubungan erat dengan disiplin geodesi, survei dan pemetaan, geomatika, fisika, hidrolika, oseanografi, geografi fisik, geologi, geofisika, nautika dan hukum laut. Beberapa referensi asing yang menjelaskan spektrum disiplin hidrografi ditulis oleh Dyer [Dyer, K. R. (1979). *Estuarine Hydrography and Sedimentation*. Cambridge University Press. Cambridge, UK] dan de Jong et al. [de Jong, C. D., Lachapelle G., Skone, S. & Elema, I. A. (2002). *Hydrography*. Delft University Press. Delft, The Netherlands].

Buku ini ditulis untuk menjadi acuan akademik bagi mahasiswa program sarjana dan buku teks pengantar bagi mahasiswa program magister dalam ilmu-ilmu kebumian dan rekayasa lingkungan. Pembagian, pengurutan dan penyajian materi dalam buku ini dirancang berdasarkan kebutuhan umum mahasiswa program sarjana dan magister di Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika, Institut Teknologi Bandung yang diselenggarakan oleh Kelompok Kepakaran Hidrografi, Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan. Buku ini juga disarankan bagi para mahasiswa yang sedang belajar atau meminati disiplin geografi fisik, teknik pantai, geologi, oseanografi fisik serta disiplin lain yang menaruh perhatian pada fenomena gerak badan air dan interaksinya dengan dasar perairan. Penulis berasumsi bahwa pembaca potensial buku ini telah mengenal fisika dasar, statistik dan kalkulus yang pasti telah diberikan di tingkat pertama atau ke

dua di fakultas-fakultas teknik, kebumian atau ilmu pengetahuan alam. Selain itu, pemahaman terhadap beberapa materi di buku ini akan lebih baik jika pembaca telah mengenal dasar-dasar ilmu ukur tanah dan pemetaan.

Topik-topik yang disajikan dalam buku ini dipilih sedemikian rupa untuk menggambarkan sebagian dari lingkup hidrografi modern, karenanya -untuk sementara- topik hidrografi klasik (navigasi laut dan survei industri lepas pantai) ditinggalkan. Survei hidrografi adalah sebagian dari aktivitas hidrografi. Pemilihan kata 'survei' pada judul buku ini sengaja dipakai untuk memperkuat konsentrasi pembahasan pada teknik-teknik pengadaan data hidrografi secara setempat (*in-situ*) dan ilustrasi penggunaannya secara deskriptif. Pengetahuan yang disajikan diusahakan terhindar informasi yang bersifat *nice to know* dengan sedapat mungkin memilih hal-hal yang *has to be known*.

Salah satu kesulitan yang dihadapi dalam penulisan buku ini adalah dalam menentukan kedalaman pembahasan. Tingkat kedalaman pembahasan yang dituliskan di buku ini merupakan pandangan subjektif penulis terhadap kebutuhan pembaca dan dianggap sebagai topik-topik yang harus diketahui pembaca. Beberapa detil, terutama operasi persamaan-persamaan matematika, sengaja tidak disajikan untuk menghindari jumlah halaman yang akan menjadi terlalu banyak. Kesulitan lain yang dihadapi adalah penyeragaman simbol. Simbol yang digunakan di buku ini masih didasarkan pada kelaziman pemakaian di tiap-tiap topik pembahasan. Karenanya, sehubungan dengan itu dan tentu saja hal-hal lainnya, dalam rangka menghindari perbedaan pemahaman, penulis membuka kesempatan untuk berdiskusi dengan para pembaca. Diskusi tersebut akan sangat bermanfaat untuk perbaikan isi dan penyajian buku ini pada edisi berikutnya.

Naskah-naskah yang menjadi bahan utama dalam buku ini tidak mungkin terpublikasikan tanpa kesediaan Refika Aditama untuk menerbitkannya. Kami menyampaikan pujian kepada Refika Aditama atas keberaniannya memilih naskah dari topik keilmuan yang dijalani sedikit orang untuk diterbitkan sebagai referensi akademik nasional. Selain itu, banyak pihak yang membuat kami bersemangat menyelesaikan buku ini. Untuk itu, kami sangat berterima kasih kepada para kontributor: Samsul Bachri, Ph.D., Hasanuddin Z. Abidin, Ph.D. dan Irdam Adil, M.T. atas sumbangan tulisan mereka yang sangat berarti untuk memperkuat isi buku ini. Kami juga berterima kasih kepada guru kami, Dr.-Ing. Sjamsir Mira, atas kesediaannya membaca dan memperbaiki naskah final kami serta memberikan kata sambutan. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada rekan-rekan di Kelompok Keahlian Hidrografi atas perhatian dan bantuan mereka. Secara khusus kami ingin memanfaatkan kesempatan ini untuk berterima kasih atas kerja keras Ibu Rose Herlina, S.Si dari Refika Aditama serta bantuan yang diberikan oleh mahasiswa kami, Melissa Suryaningtyas, dalam menyiapkan gambar-gambar dan mengumpulkan naskah-naskah dasar yang berserakan di atas meja kerja, lemari dan komputer kami. Buku ini kami persembahkan untuk mantan guru-guru kami dan para mahasiswa -yang kami harap dapat memberikan umpan balik atas materi yang ditulis dalam buku ini.

Bandung, Januari 2005

Dr. *der Nat.* Poerbandono, S.T., M.M. & Ir. Eka Djunarsjah, M.T.
poerbandono@gd.itb.ac.id ; http://laut.gd.itb.ac.id

Daftar Isi

SAMBUTAN
PENGANTAR PENULIS
DAFTAR ISI

Bab 1 PENDAHULUAN -- 1

A. Terminologi dan Perkembangan Hidrografi 1
B. Definisi dan Lingkup Hidrografi 2
C. Kelembagaan Hidrografi 4
D. Kompetensi Profesi dan Akademisi Hidrografi 4
E. Konfigurasi Survei Hidrografi 5
F. Referensi Akademik Hidrografi 6
Referensi 7

Bab 2 SISTEM REFERENSI GEODETIK DAN PENENTUAN POSISI DI LAUT -- 9

A. Sistem Referensi Geodetik 9
a. Sistem Koordinat 10
b. Datum Geodetik 12
c. Proyeksi Peta 14
B. Penentuan Posisi di Laut 20
a. Geometri Garis Posisi 20
b. Penentuan Posisi Berbasis Garis Posisi 22
c. Teknik Penentuan Posisi secara Optik 24
d. Penentuan Posisi secara Elektronik 29
C. Penentuan Posisi dengan GPS 32
a. Karakteristik Sistem GPS 33
b. Metode Penentuan Posisi dengan GPS 37

c. Ketelitian Posisi GPS 39
d. Aplikasi Penentuan Posisi GPS dalam Bidang Survei Kelautan 40
e. Keunggulan Metode Penentuan Posisi GPS 46
f. Kendala GPS dalam Penentuan Posisi 47
Referensi 48

Bab 3 PASUT DAN DATUM VERTIKAL -- 51

A. Pasut 51
a. Teori Pasut 52
b. Model Matematika Pasut dan Konstanta Harmonik 55
c. Tipe Pasut 55
B. Arus Pasut 57
C. Datum Vertikal 59
a. Pengamatan Pasut 63
b. Pengikatan Stasiun Pengamat Pasut 66
D. Prediksi Pasut 67
a. Analisis Harmonik 68
b. Prediksi LAT 69
c. Pengaruh Faktor-faktor Non-Harmonik 69
Referensi 70

Bab 4 PEMERUMAN -- 71

A. Pengukuran Kedalaman 73
a. Desain Lajur Perum 73
b. Prinsip Penarikan Garis Kontur 74
c. Teknik Pengukuran Kedalaman 74
B. Akustik Bawah Air untuk Pemeruman 81
a. Sifat Gelombang Akustik 82
b. Alat Perum Gema 83
c. Sumber Kesalahan dan Kalibrasi 86
d. Pemeriksaan Data Pemeruman 89
C. Detil Situasi dan Garis Pantai 91
a. Garis Pantai 91
b. Pengukuran Detil Situasi dan Garis Pantai 92
D. Beberapa Ketentuan tentang Kartografi Peta Laut 94
Referensi 96

Bab 5 PENGUKURAN ARUS DAN SEDIMEN -- 97

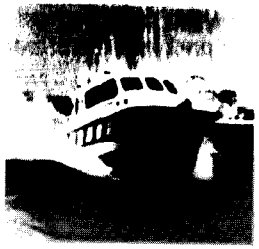
A. Pengukuran Arus 97
a. Sifat Gerakan Badan Air 97
b. Prosedur Pengukuran Arus 100
c. Prinsip Pengukuran Arus dengan Cara Akustik 103
d. Pengolahan dan Penyajian Data Pengukuran Arus 107
B. Pengukuran dan Analisis Sedimen 109
a. Karakter Sedimen 111
b. Pengambilan Contoh Sedimen 112
c. Analisis Distribusi Ukuran Butir 117
d. Analisis Konsentrasi Sedimen 119
Referensi 121

Bab 6 PENETAPAN BATAS LAUT -- 123

A. Konsep Batas Laut Berdasarkan UNCLOS 1982 124
B. Wilayah Perairan Berdasarkan UNCLOS 1982 125
a. Perairan Pedalaman 125
b. Laut Teritorial 125
c. Zona Tambahan 126
d. Zona Ekonomi Eksklusif 127
e. Landas Kontinen 127
f. Laut Lepas 129
C. Penetapan Batas Laut di Indonesia 129
D. Implementasi Penetapan Batas Laut Daerah di Lapangan 132
a. Penentuan Lokasi Daerah Survei 132
b. Pemasangan Pilar Titik Referensi 133
c. Penggambaran dan Penentuan Koordinat Titik Batas 134
Referensi 135

Lampiran A Transformasi Koordinat 137
Lampiran B Model Matematika Penentuan Posisi 141
Lampiran C Segiempat dan Elips Kesalahan 147
Lampiran D Standar Ketelitian Survei Hidrografi 155

TENTANG PENULIS -- 163



Bab 1
Pendahuluan

A. TERMINOLOGI DAN PERKEMBANGAN HIDROGRAFI

Kata hidrografi merupakan serapan dari bahasa Inggris *'hydrography'*. Secara etimologis, *'hydrography'* ditemukan dari kata sifat dalam bahasa Prancis abad pertengahan *'hydrographique'*, sebagai kata yang berhubungan dengan sifat dan pengukuran badan air, misalnya: kedalaman dan arus (Merriam-Webster Online, 2004). Tabel 1.1 memperlihatkan beberapa makna leksikal *'hydrography'* beserta sumbernya.

Tabel 1.1 Makna leksikal *'hydrography'*

DEFINISI	SUMBER
The art and science of compiling and producing charts, or maps, of water-covered areas of the Earth's surface.	Encyclopaedia Britannica (2004)
The science of the measurement and description and mapping of the surface of the earth with special reference to navigation	HyperDictionary (2004)
The art of measuring and describing the sea, lakes, rivers, and other waters, with their phenomena. *That branch of surveying which embraces the determination of the contour of the bottom of a harbor or other sheet of water, the depth of soundings, the position of channels and shoals, with the construction of charts exhibiting these particulars.*	Webster's 1913 (2004); BrainyDictionary (2004)

Hingga sekitar akhir 1980-an, kegiatan hidrografi utamanya didominasi oleh survei dan pemetaan laut untuk pembuatan peta navigasi laut (*nautical chart*) dan survei untuk eksplorasi minyak dan gas bumi (Ingham, 1975). Peta navigasi laut memuat informasi penting yang diperlukan untuk menjamin keselamatan pelayaran, seperti: kedalaman perairan, rambu-rambu navigasi, garis pantai, alur pelayaran, bahaya-bahaya pelayaran dan sebagainya. Selain itu, kegiatan hidrografi juga didominasi oleh penentuan posisi dan kedalaman di laut lepas yang mendukung eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas bumi.

Selama 20 tahun terakhir, telah terjadi pergeseran mendasar pada lingkup dan aplikasi hidrografi. Hidrografi tidak lagi semata-mata dikaitkan dengan pemetaan laut dan penentuan posisi, melainkan juga dengan Hukum Laut (*Law of the Sea*) dan aspek fisik dari Pengelolaan Kawasan Pesisir secara Terpadu (*Integrated Coastal Zone Management*) (Dyer, 1979; de Jong et al., 2002). Pergeseran ini diakibatkan oleh kemajuan teknologi instrumen pengukuran dan komputasi. Selain itu, pergeseran ini juga diakibatkan oleh permintaan masyarakat dan industri pengguna produk hidrografi sebagai akibat dari meningkatnya kegiatan manusia di kawasan perairan.

Pergeseran ini juga ditandai dengan munculnya program-program pendidikan akademik setingkat sarjana dan magister di Amerika (misalnya: *University of Southern Mississippi*), Inggris (misalnya: *University of Plymouth* dan *University College London*), Jerman (*Fachhochschule Hamburg-Harburg*), Malaysia (Universiti Teknologi Malaysia) dan Indonesia (Dinas Hidro-oseanografi TNI-AL dan Institut Teknologi Bandung). Dewasa ini, hidrografi mulai dipahami sebagai salah satu cabang ilmu yang secara khusus di Indonesia mulai dikembangkan pada tahun 1990an (Mira, 1998; 1999).

B. DEFINISI DAN LINGKUP HIDROGRAFI

Definisi akademik untuk terminologi hidrografi, dikemukakan pertama kali oleh *International Hydrographic Organization* (IHO) pada *Special Publication Number* 32 (SP-32) tahun 1970 dan *Group of Experts on Hydrographic Surveying and Nautical Charting* dalam laporannya pada *Second United Nations Regional Cartographic Conference for the Americas* di Mexico City tahun 1979. IHO mengemukakan bahwa hidrografi adalah ***'that branch of applied science which deals with measurement and description of physical features of the navigable portion of earth's surface and adjoining coastal areas, with special reference to their use for the purpose of navigation'***. *Group of Experts on Hydrographic Surveying and Nautical Charting* mengemukakan bahwa hidrografi adalah ***'the science of measuring, describing, and depicting nature and configuration of the seabed, geographical relationship to landmass, and characteristics and dynamics of the sea'***.

Perkembangan hidrografi juga mengakibatkan perubahan definisi hidrografi yang oleh IHO didefinisikan sebagai ***'that branch of applied sciences which deals with the measurement and description of the features of the seas and coastal areas for the primary purpose of navigation and all other marine purposes and activities, including -inter alia- offshore activities, research, protection of the environment, and prediction services'*** (Gorziglia, 2004). Buku ini mengadopsi definisi hidrografi yang didokumentasikan oleh Kelompok Keahlian (KK) Hidrografi, Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Bandung, yaitu **'cabang ilmu yang berkepentingan dengan pengukuran dan deskripsi sifat dan bentuk dasar perairan dan dinamika badan air'** (KK Hidrografi, 2004).

Fenomena dasar perairan yang disebut dalam definisi di atas meliputi batimetri atau 'topografi' dasar laut, jenis material dasar laut dan morfologi dasar laut. Sementara dinamika badan air yang disebut dalam definisi di atas meliputi: pasut (dan muka air) dan arus. Data mengenai fenomena dasar perairan dan dinamika badan air diperoleh melalui pengukuran yang kegiatannya disebut sebagai survei hidrografi. Data yang diperoleh dari survei hidrografi kemudian diolah dan disajikan sebagai informasi geospasial atau informasi yang terkait dengan posisi di muka bumi. Sehubungan dengan itu maka seluruh informasi yang disajikan harus memiliki data posisi dalam ruang yang mengacu pada suatu sistem referensi tertentu. Oleh karenanya, posisi suatu objek di atas, di dalam dan di dasar perairan merupakan titik perhatian utama dalam hidrografi. Informasi hidrografi utamanya ditujukan untuk:

(1) Navigasi dan keselamatan pelayaran,

(2) Penetapan batas wilayah atau daerah di laut; dan

(3) Studi dinamika pesisir dan pengelolaan sumberdaya laut.

Pengguna produk hidrografi terdiri dari berbagai sektor, utamanya transportasi maritim dan navigasi, pengelolaan kawasan pesisir, eksplorasi

dan eksploitasi sumberdaya laut, pengelolaan lingkungan laut, rekayasa lepas pantai, hukum laut dan zona ekonomi eksklusif serta aplikasi-aplikasi survei di pesisir dan laut lainnya.

C. KELEMBAGAAN HIDROGRAFI

International Hydrographic Organization (IHO) adalah lembaga internasional yang berwenang untuk mengelola dan menyelenggarakan penerbitan berbagai publikasi untuk keperluan navigasi. Lembaga ini berkedudukan di Monaco dan dikelola oleh representasi pakar-pakar hidrografi dunia -dan bidang lain yang berkaitan langsung-. Dalam melaksanakan tugasnya, IHO menunjuk dan membentuk kepanitiaan khusus dalam bentuk *working group*. Secara teknis, kewenangan IHO dilaksanakan oleh *International Hydrographic Bureau* (IHB). IHO beranggotakan negara-negara yang berkepentingan dengan navigasi laut dan keselamatan pelayaran. Di beberapa negara maju, seperti Amerika Serikat, Inggris dan Jerman, terdapat pula lembaga profesi yang menampung aspirasi aplikasi hidrografi yang lebih luas. Lembaga ini disebut sebagai *The Hydrographic Society* atau Masyarakat Hidrografi.

Di setiap negara, ditunjuk sebuah kantor hidrografi nasional yang diberi kewenangan sejenis untuk wilayahnya. Semua publikasi internasional yang dikeluarkan oleh IHO akan diratifikasi oleh kantor hidrografi nasional di setiap negara. Dinas Hidro-oseanografi (Dishidros) TNI-AL adalah lembaga yang berwenang menjalankan tugas sebagai kantor hidrografi nasional untuk Indonesia. Lembaga hidrografi ini adalah badan resmi yang berwenang menerbitkan, merevisi dan memutakhirkan peta laut berikut ketentuan teknisnya, standar mutu penyelenggaraan survei hidrografi, akreditasi kualifikasi hidrografer, penerbitan publikasi nautika (daftar pasut, berita pelaut, daftar pelabuhan, daftar suar, daftar rambu, almanak nautika), aturan pelayaran dan lainnya yang berkaitan dengan hidrografi, navigasi, survei serta pemetaan laut dan pelayaran.

D. KOMPETENSI PROFESI DAN AKADEMISI HIDROGRAFI

Kompetensi profesi (praktisi) dan akreditasi pendidikan tinggi hidrografi disertifikasi oleh IHO bersama-sama dengan *International Federation of Surveyors* (*Fédération Internationale des Géomètres*-FIG). Profesi dan

akademisi hidrografi dikelompokkan menjadi beberapa aplikasi yaitu (IHB, 2001):

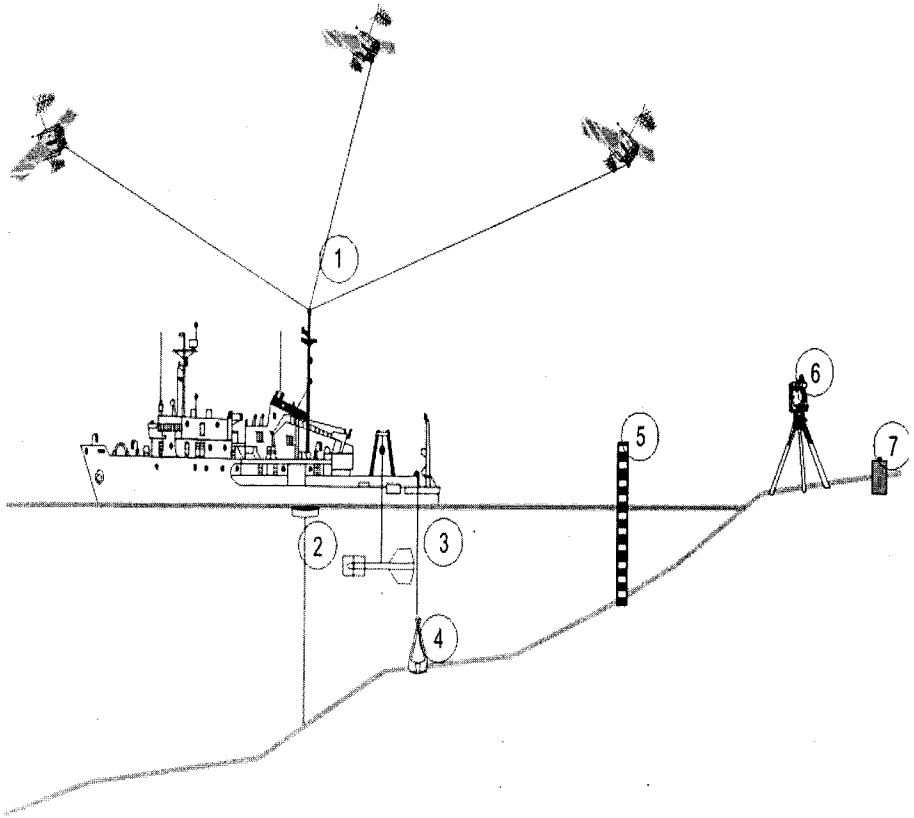
(1) *Nautical Charting*
(2) *Military*
(3) *Inland Water*
(4) *Coastal Zone Management*
(5) *Offshore Seismic*
(6) *Offshore Construction*
(7) *Remote Sensing*

Aplikasi *nautical charting* (pemetaan laut) ditujukan untuk menghasilkan jasa dan produk informasi hidrografi untuk keselamatan navigasi. Aplikasi *military* (militer) diutamakan untuk navigasi (kapal selam) dan deteksi (ranjau) bawah air. Aplikasi *inland water* (perairan pedalaman) ditujukan untuk pengelolaan daerah aliran sungai dan lingkungan perairan pedalaman lainnya (termasuk: danau dan bendungan). Aplikasi *coastal zone management* (pengelolaan kawasan pesisir) ditujukan untuk pemeliharaan investasi (utamanya: infrastruktur perhubungan laut) di kawasan pesisir. Aplikasi *offshore seismic* dan *construction* (industri lepas pantai) diutamakan untuk mobilisasi anjungan minyak dan gas bumi serta survei seismik. Aplikasi *remote sensing* diutamakan untuk akusisi data regional dan global bagi kepentingan pemantauan lingkungan secara berkala.

E. KONFIGURASI SURVEI HIDROGRAFI

Survei adalah kegiatan terpenting dalam menghasilkan informasi hidrografi. Buku ini membahas aktivitas utama survei hidrografi yang meliputi (Gambar 1.1):

- Penentuan posisi di laut *(1)* dan penggunaan sistem referensi *(7)*
- Pengukuran kedalaman (pemeruman) *(2)*
- Pengukuran arus *(3)*
- Pengukuran (pengambilan contoh dan analisis) sedimen *(4)*
- Pengamatan pasut *(5)*
- Pengukuran detil situasi dan garis pantai (untuk pemetaan pesisir) *(6)*



Gambar 1.1 **Konfigurasi survei hidrografi**

Data yang diperoleh dari aktivitas-aktivitas tersebut di atas dapat disajikan sebagai informasi dalam bentuk peta dan non-peta serta disusun dalam bentuk basis data kelautan.

F. REFERENSI AKADEMIK HIDROGRAFI

Sebagian besar referensi tentang hidrografi berasosiasi dengan pendidikan profesional hidrografi dan publikasi-publikasi IHO. Daftar publikasi IHO dapat diperoleh dari www.iho.shom.fr. Beberapa referensi akademik terpilih tentang hidrografi antara lain ditulis oleh Ingham (1975, 1984, 2000), Ingham & Abott (1992), Dyer (1979) dan de Jong et al. (2002). Kompilasi dari beberapa referensi akademik pernah didokumentasikan dan dipakai sebagai acuan akademik oleh Kelompok Bidang Kelautan (sekarang: Kelompok

Keahlian Hidrografi (1989). Jurnal ilmiah khusus tentang hidrografi antara lain adalah *The Hydrographic Journal* yang diterbitkan oleh *The Hydrographic Society*, sedangkan artikel-artikel ilmiah populer tentang hidrografi dipublikasikan oleh majalah *Hydro INTERNATIONAL*.

Referensi

BrainyDictionary (2004). http://www.brainydictionary.com.

de Jong, C. D., Lachapelle G., Skone, S. & Elema, I. A. (2002). *Hydrography*. Delft University Press. Delft, The Netherlands.

Dyer, K. R. (1979). *Estuarine Hydrography and Sedimentation*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.

Encyclopaedia Britannica (2004). http://www.britannica.com.

Gorziglia, H. (2004). *International Hydrographic Organization Activities*. Dalam: Poerbandono (ed.). *The Spectrum of Hydrography*. Departemen Teknik Geodesi, Institut Teknologi Bandung.

HyperDictionary (2004). www.hyperdictionary.com.

Ingham, A. E. & Abott, V. J. (1992). *Hydrography for the Surveyor and Engineer*. Blackwell Science.

Ingham, A. E. (1975). *Sea Surveying*. John-Wiley.

Ingham, A. E. (1984). *Hydrography for the Surveyor and Engineer*. Crosby Lockwood Staples.

Ingham, A. E. (2000). *Hydrography for the Surveyor and Engineer*. Blackwell Science.

International Hydrographic Organization - IHO (2002). *Standards of Competence for Hydrographic Surveyors*. M-5 9th Edition. International Hydrographic Bureau – IHB, Monaco.

Kelompok Keahlian Hidrografi (2004). *Program Penelitian, Pendidikan dan Pemberdayaan Masyarakat 2005-2010*. Naskah Akademik. Departemen Teknik Geodesi, Institut Teknologi Bandung.

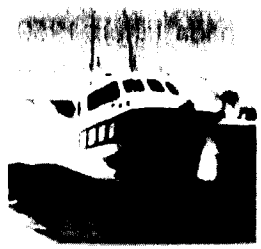
Kelompok Bidang Keahlian Kelautan (1989). *Pendidikan Survei Hidrografi ITB-PERTAMINA*. Diktat Kuliah. Jurusan Teknik Geodesi, Institut Teknologi Bandung.

Merriam-Webster Online (2004). http://www.m-w.com.

Mira, S. (1998). *Hydrography in Indonesia*. Hydro INTERNATIONAL, November/December.

Mira, S. (1999). *Hydrography as a Science*. Hydro INTERNATIONAL, April.

Webster's 1913 (2004). www.hyperdictionary.com.



Bab 2

Sistem Referensi Geodetik dan Penentuan Posisi di Laut

Penentuan posisi (suatu objek) di laut (termasuk juga wilayah perairan lainnya) merupakan kegiatan utama dalam survei hidrografi. Objek yang dimaksud dapat terletak di (i) permukaan laut, (ii) antara permukaan dan dasar laut atau (iii) dasar laut. Objek tersebut diwakili oleh sebuah titik yang memiliki posisi yang dinyatakan terhadap suatu sistem referensi geodetik tertentu.

A. SISTEM REFERENSI GEODETIK

Setelah melalui sejarah yang panjang, pemahaman mengenai 'bentuk bumi' telah diperbaiki mulai dari model bumi datar hingga ke model model berbentuk bola yang cukup memenuhi ketelitian untuk keperluan eksplorasi global, navigasi dan pemetaan. Kini, dari pengamatan-pengamatan satelit selama bertahun-tahun, disimpulkan bahwa datum geodetik yang cocok digunakan dalam pengukuran-pengukuran adalah elipsoid. Sistem referensi geodetik menggunakan elipsoid sebagai bidang referensi untuk menyatakan posisi horisontal suatu titik. Elipsoid tersebut disebut sebagai datum horisontal yang pusatnya berimpit dengan pusat massa bumi. Sistem yang demikian disebut sebagai sistem geosentrik. Pada masa lalu sulit untuk merealisasikan sistem yang geosentrik sehingga yang digunakan adalah datum lokal dan regional. Akibat penggunaan datum geodetik yang berbeda, suatu titik tertentu di laut dapat mempunyai koordinat geodetik yang berbeda pula, sehingga diperlukan hubungan antar sistem referensi geodetik yang dinyatakan dalam suatu persamaan transformasi koordinat antar datum (elipsoid).

Sejak munculnya teknologi penentuan posisi berbasis satelit, dunia menuju ke arah penggunaan datum geodetik global menggantikan datum

lokal dan regional. Datum global pertama ditetapkan pada tahun 1960 dengan nama *World Geodetic System* (WGS-60) untuk keperluan pemetaan darat dan laut serta navigasi. Versi terbaru yang masih digunakan hingga saat ini adalah WGS-84, yang dikembangkan untuk menggantikan WGS-72, yang diperoleh dari data, teori dan teknik terbaru tentang penentuan bentuk bumi. Pada tahun 1979, *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG) menerima proposal *Internasional Association of Geodesy* (IAG) untuk menggunakan *Geodetic Reference System* yang baru (GRS 80) sebagai referensi untuk pekerjaan-pekerjaan geodetik, menggantikan GRS 67, dan mempunyai sedikit perbedaan dengan WGS-84. Pada tahun 1983, IHO menggunakan WGS-84 sebagai sistem referensi global untuk peta laut.

a. Sistem Koordinat

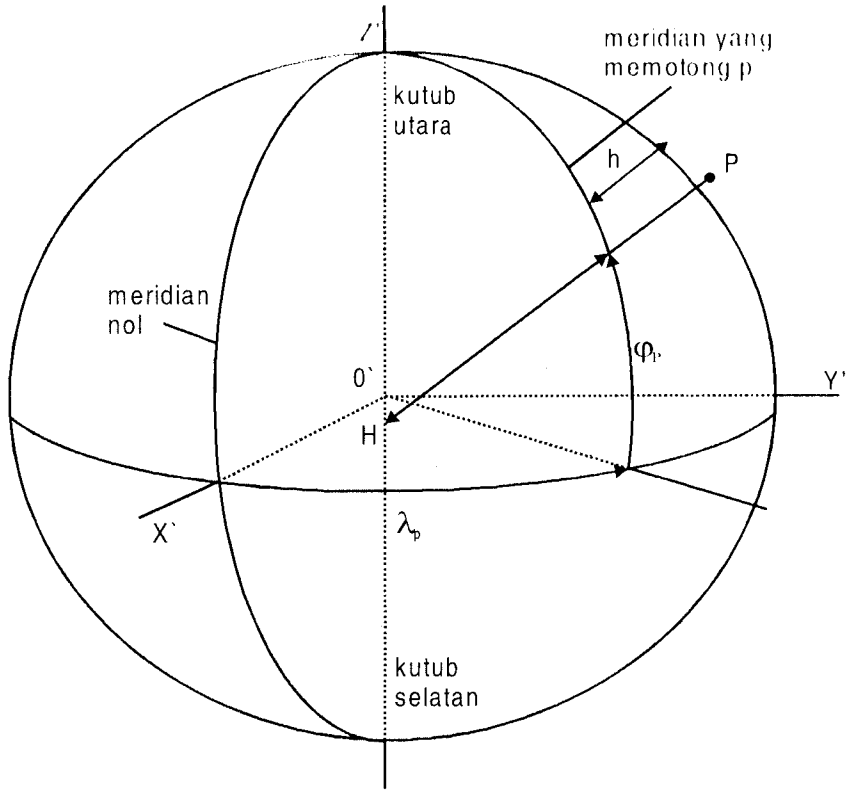
Lokasi tertentu atau posisi suatu titik di permukaan bumi dinyatakan dalam sistem koordinat. Sistem koordinat yang paling banyak digunakan saat ini adalah sistem koordinat geodetik. Posisi suatu titik dapat juga dinyatakan terhadap sistem koordinat kartesian yang berpusat di bumi dan melekat di bumi.

Sistem Koordinat Geodetik

Sistem koordinat geodetik mempunyai parameter lintang, bujur dan tinggi geodetik. Meridian utama (*prime meridian*) atau meridian nol, yaitu meridian yang melalui Greenwich dan ekuator (*equator*) merupakan acuan yang digunakan untuk mendefinisikan lintang dan bujur, sedangkan tinggi dinyatakan terhadap permukaan elipsoid (misalnya: Davis, et al., 1981). Lintang geodetik dari suatu titik (misalnya *P*) adalah sudut dari bidang ekuator ke arah vertikal dari garis normal elipsoid referensi yang melalui titik tersebut. Bujur geodetik suatu titik adalah sudut antara suatu bidang referensi (misalnya: meridian utama) dan suatu bidang meridian yang melalui titik, yang keduanya tegak lurus bidang ekuator. Tinggi geodetik pada suatu titik adalah jarak dari elipsoid referensi ke titik dalam arah normal ke elipsoid (Gambar 2.1).

Sistem Koordinat Kartesian

Pada sistem koordinat kartesian yang berpusat di bumi dan melekat di bumi (*Earth Centered Earth Fixed* – ECEF), posisi suatu titik diwakili oleh parameter *X*, *Y* dan *Z* yang menyatakan posisi tiga dimensi yang berkaitan

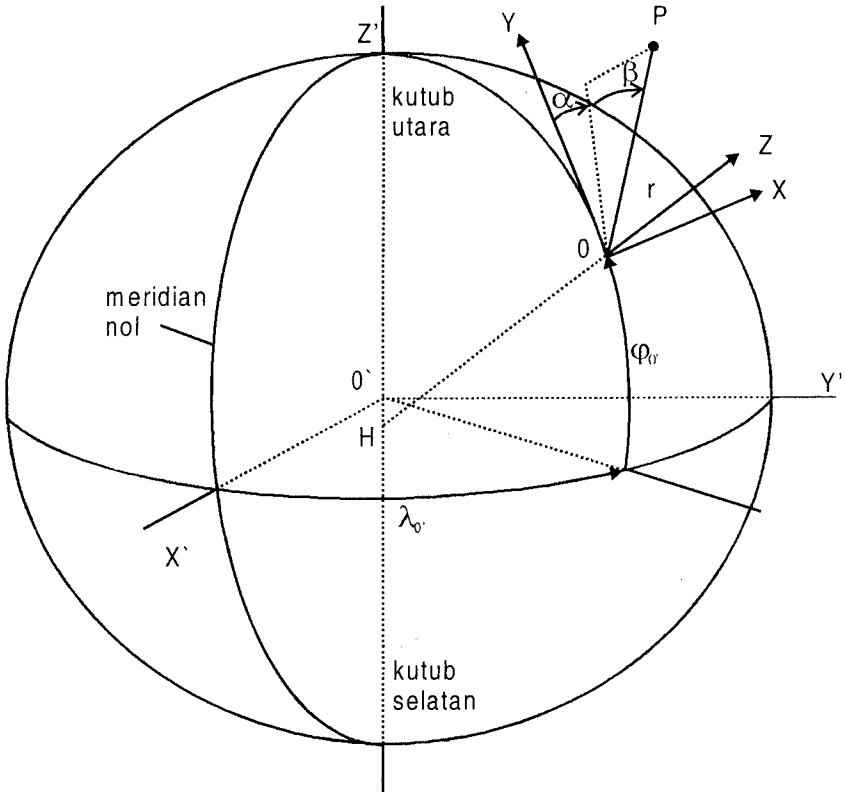


Gambar 2.1 **Lintang (φ_p), bujur (λ_p) dan tinggi (h) geodetik titik P pada sistem koordinat geodetik**

dengan pusat massa elipsoid referensi (Gambar 2.2). Karakteristik sistem koordinat ECEF adalah:

- Sumbu-*Z* ke arah Kutub Utara.
- Sumbu-*X* adalah perpotongan bidang yang dilalui meridian utama dan bidang ekuator.
- Sumbu-Y adalah perpotongan suatu bidang yang membentuk sudut 90° sebelah timur sumbu-*X* dan bidang ekuator, sehingga merupakan sistem ortogonal tangan kanan.

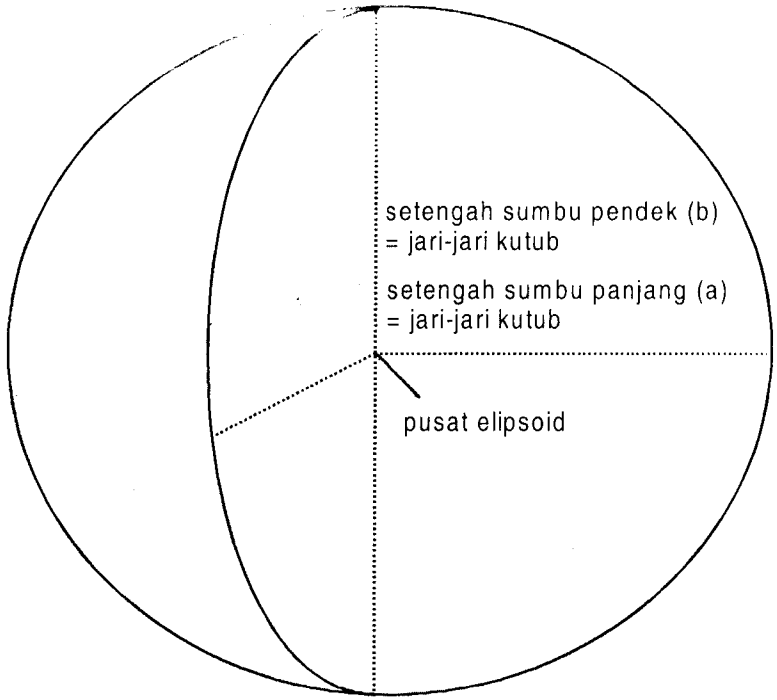
Rumus-rumus untuk konversi posisi titik pada sistem koordinat kartesian ke sistem koordinat geodetik dan sebaliknya didokumentasikan pada Lampiran A.



Gambar 2.2 **Sistem koordinat kartesian tiga dimensi**

b. Datum Geodetik

Penentuan suatu datum geodetik didasarkan pada bentuk bumi, sedangkan penetapan suatu sistem referensi didasarkan pada keperluan menggambarkan posisi geografis suatu titik. Elipsoid yang digunakan sebagai sistem referensi untuk menyatakan posisi suatu titik, mempunyai parameter-parameter: setengah sumbu panjang (jari-jari ekuator *a*) dan koefisien pegepengan (hubungan antara jari-jari ekuator dan kutub $f = (a-b)/a$). Parameter-parameter elipsoid referensi lainnya seperti setengah sumbu pendek (jari-jari kutub *b*) dan eksentrisitas $e = (a^2-b^2)/b^2 = f(2-f)$ dapat dihitung dari *a*, *b* dan *f*. Gambar 2.3 memperlihatkan parameter-parameter sebuah elipsoid.

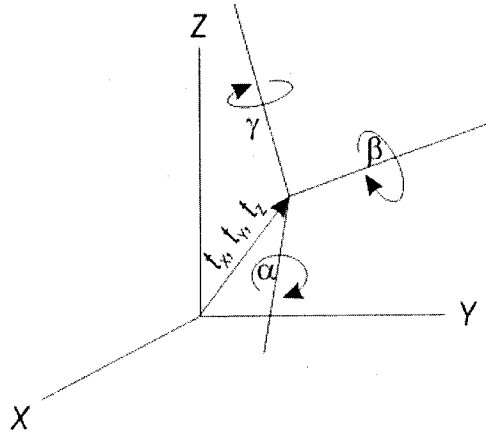


Gambar 2.3 **Parameter-parameter elipsoid**

WGS-1984 telah digunakan oleh sistem penentuan posisi global sejak 1987 dan menjadi datum standar yang disepakati secara internasional sebagai datum untuk sistem referensi horisontal. Elipsoid yang digunakan adalah GRS (*Geodetic Reference System*) 1980 dengan parameter *a* = 6,378,137m dan modifikasi *f* = 1/298.257223563, yang berpusat di pusat bumi (*geocentric ellipsoid*). Negara-negara dan badan-badan dunia menggunakan datum yang berbeda sebagai sistem referensi yang digunakan untuk penentuan posisi pada sistem informasi geografi (*Geographic Information System* GIS), sistem penentuan posisi teliti maupun sistem navigasi.

Perbedaan penggunaan datum geodetik dan kemajuan teknologi pengukuran-pengukuran untuk penentuan posisi secara global dengan ketelitian hingga desimeter membutuhkan pemilihan datum secara hati-hati dan transformasi antara koordinat-koordinat dalam datum yang berbeda. Kesalahan pengikatan koordinat geodetik ke datum tertentu mengakibatkan kesalahan posisi hingga ratusan meter. Konversi antar datum dapat dilakukan dengan memperhitungkan tujuh parameter transformasi yang meliputi tiga

parameter translasi (t_x, t_y, t_z), tiga parameter rotasi (α, β, γ) dan satu parameter skala (Gambar 2.4). Rumus-rumus yang digunakan untuk melakukan konversi posisi titik pada sustu datum ke datum lain didokumentasikan pada Lampiran A.



Gambar 2.4 **Transformasi datum**

c. Proyeksi Peta

Bentuk bumi yang didekati dengan elipsoid mempunyai permukaan yang melengkung. Karenanya, proyeksi posisi titik di permukaan bumi pada peta tidak mungkin dilakukan tanpa distorsi. Salah satu proyeksi peta yang lazim digunakan dalam geodesi adalah proyeksi konform. Proyeksi ini mempertahankan sudut yang dibentuk oleh perpotongan dua kurva, sehingga sudut yang digambar di peta akan sama dengan sudut yang berada di permukaan elipsoid. Proyeksi peta dipilih sedemikian rupa sehingga meminimasi beberapa distorsi tertentu (karena tidak mungkin semua distorsi dihilangkan). Dengan demikian, dalam proses pembuatan peta, dilakukan pemilihan proyeksi peta akan tergantung pada persyaratan khusus dari peta yang akan dibuat.

Peta laut yang digunakan untuk navigasi memilih proyeksi Mercator yang menggunakan silinder tegak sebagai bidang proyeksi. Proyeksi ini menggambarkan *loxodrome* (garis jarak terpendek yang menghubungkan dua titik di permukaan bumi) sebagai garis lurus (mempunyai azimut yang tetap). Kelemahan proyeksi ini adalah jarak dan luas yang terdistorsi

(bertambah besar dengan semakin besarnya lintang). Peta laut yang digunakan untuk penentuan batas wilayah perairan, menggunakan proyeksi konform, yang menghasilkan pengukuran sudut, jarak dan arah dengan distorsi yang minimum dibandingkan dengan proyeksi lain.

Berdasarkan kebutuhan dan karakteristik area yang dicakup, pilihan proyeksi yang cocok untuk peta laut adalah:

- *Mercator*
- *Lambert*
- *Transverse Mercator*
- Stereografik

Semua proyeksi di atas merupakan proyeksi yang konform (bentuk dan sudut di peta sama dengan di atas elipsoid). Namun demikian, proyeksi *Mercator* cocok untuk daerah sekitar ekuator (lintang <15°) dengan pilihan skala peta yang sesuai karena distorsi akan bertambah besar pada peta skala kecil. Proyeksi *Lambert* cocok untuk daerah lintang 4° hingga 72° dengan distorsi luas yang cukup kecil (sekitar 2%). Proyeksi *Transverse Mercator* menggunakan silinder transversal sebagai bidang proyeksinya, sehingga area di sekitar meridian yang bersinggungan dengan silinder mempunyai distorsi yang minimum. Proyeksi *Universal Transverse Mercator* (UTM) khusus dipakai di seluruh dunia dengan menggunakan meridian pusat standar pada setiap interval 6° dari meridian bumi. Proyeksi stereografik tergolong proyeksi azimutal konform yang berpusat di kutub dan dianjurkan untuk dipakai pada daerah dengan lintang di atas 80°.

Bagi keperluan pembuatan Peta Navigasi Laut Indonesia, yang diproduksi oleh Dishidros TNI-AL digunakan Proyeksi *Mercator*. Sistem proyeksi ini dianggap paling sesuai dengan karakteristik wilayah perairan Indonesia yang terletak di sekitar ekuator. Untuk keperluan tertentu, seperti pembuatan Peta Lingkungan Pantai Indonesia (LPI) dan Peta Lingkungan Laut Nasional (LLN) digunakan Proyeksi UTM karena dapat menyajikan data yang terintegrasi antara daratan dan lautan. Peta Rupa Bumi produksi Bakosurtanal menggunakan Proyeksi UTM. Dengan demikian, saat ini di Indonesia, lebih banyak menggunakan dua macam jenis sistem proyeksi peta saja, yaitu Mercator dan UTM.

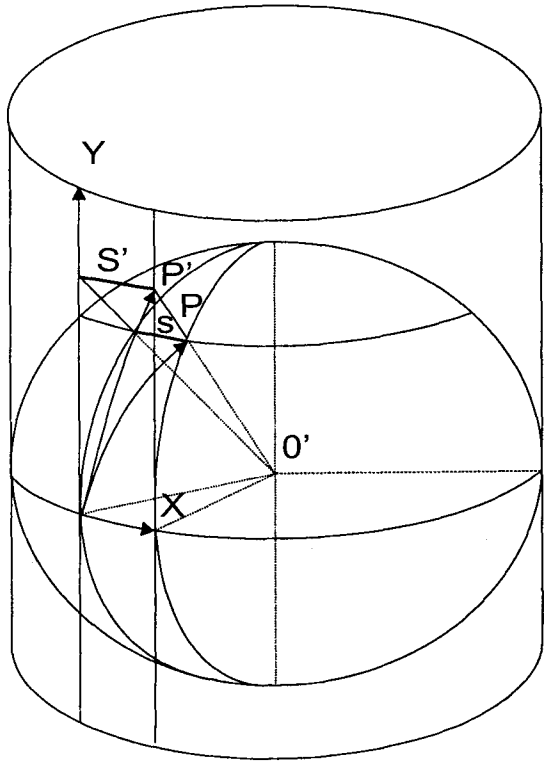
Sistem Proyeksi *Mercator*

Sistem proyeksi Mercator menggunakan bidang proyeksi silinder dengan sumbu simetri bidang proyeksinya berimpit dengan sumbu elipsoid

(normal) dan tidak terdapat distorsi bentuk/sudut atau disebut sebagai *cylinder normal conform*. Proyeksi ini diperkenalkan oleh Mercator pada tahun 1550 dan 40 tahun kemudian Wright memberikan penjelasan matematisnya. Karakteristik yang dimiliki oleh proyeksi ini adalah:

- Faktor skala tetap di sekitar ekuator.
- Konvergensi meridian sama dengan nol.
- Meridian dan paralel berpotongan tegak lurus.
- Interval antar meridian sama.
- Interval antar paralel membesar semakin jauh dari ekuator.

Peta Navigasi Laut Indonesia yang dipublikasikan Dishidros TNI-AL menggunakan sistem Proyeksi Mercator. Pada Proyeksi Mercator umumnya sumbu-*X* merupakan proyeksi dari ekuator (lintang nol), sedangkan Peta Navigasi Laut Indonesia menggunakan proyeksi lintang tengah sebagai sumbu-*X*. Proyeksi sumbu-*Y* dapat dipilih sesuai keperluan. Biasanya, menggunakan proyeksi meridian Jakarta (Gambar 2.5).



Gambar 2.5 **Sistem koordinat bidang Proyeksi Mercator**

Oleh karena sumbu simetri bidang proyeksi berimpit dengan sumbu elipsoid, maka distorsi jarak adalah nol di ekuator, namun semakin membesar dengan bertambahnya lintang. Di kutub, distorsi skala menjadi tak berhingga. *Loxodrome* yang memotong meridian-meridian dengan besar sudut yang sama atau lengkungan dengan azimut yang tetap, akan diproyeksikan sebagai garis lurus di bidang proyeksi *Mercator*. Hal ini sesuai untuk keperluan navigasi, karena pelaut sangat membutuhkan informasi tentang arah antar dua titik posisi yang benar pada peta dengan fakta sesungguhnya di lapangan.

Sistem Proyeksi *Transverse Mercator*

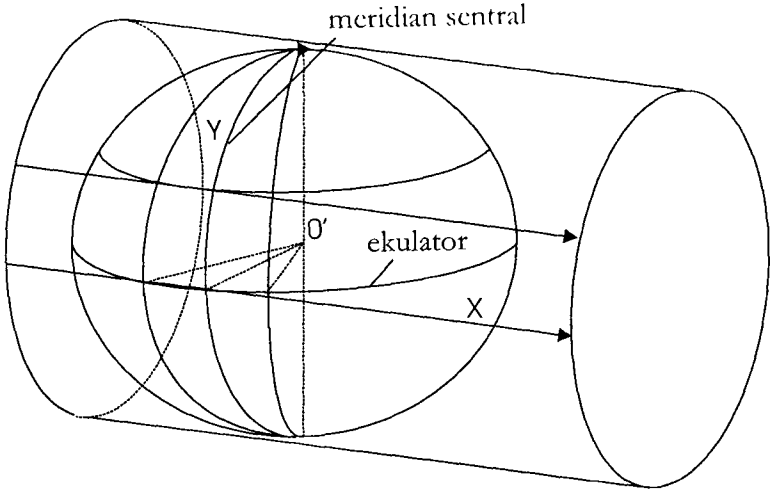
Proyeksi *Transverse Mercator* (TM) menggunakan bidang proyeksi silinder dengan sumbu simetri bidang proyeksi tegak lurus dengan sumbu elipsoid (*transverse*) dan tidak terjadi distorsi bentuk/sudut (*conform*) atau disingkat *cylinder transverse conform*. Proyeksi ini diperkenalkan oleh *Lambert* pada tahun 1772 dan 50 tahun kemudian Gauss memberikan penurunan analitisnya. Tahun 1912, Krüger menyelesaikan penurunan matematisnya, sehingga memudahkan dalam perhitungan-perhitungan numerisnya. Karakteristik lain yang lebih spesifik yang dimiliki oleh proyeksi ini adalah:

- Faktor skala tetap di meridian sentral.
- Semakin jauh dari meridian sentral, konvergensi meridian akan semakin membesar.
- Meridian dan paralel berpotongan tegak lurus.
- Pada lintang yang sama (satu garis paralel), faktor skala akan membesar dengan membesarnya bujur relatif terhadap meridian sentral.
- Pada bujur yang sama (satu garis meridian), faktor skala akan mengecil dengan membesarnya lintang.

Pada sistem proyeksi *Transverse Mercator*, sumbu-*X* merupakan proyeksi dari ekuator (lintang nol), sedangkan sumbu-*Y* dapat dipilih sesuai keperluan (Gambar 2.6).

Sistem Proyeksi Universal Transverse Mercator

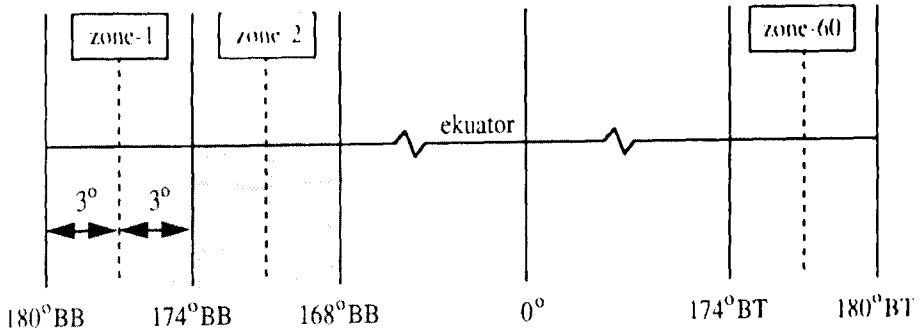
Proyeksi *Universal Transverse Mercator* (UTM) tergolong proyeksi *Transverse Mercator* (TM) yang mempunyai karakteristik khusus dan telah dibakukan untuk seluruh dunia. Karakteristik khusus yang telah dibakukan tersebut diantaranya tentang pembagian, penomoran dan penentuan posisi



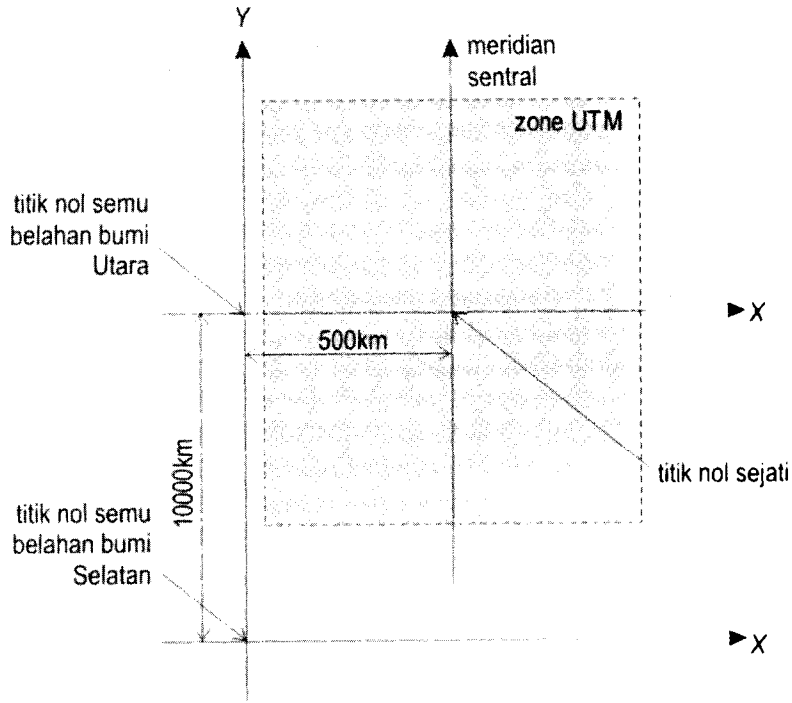
Gambar 2.6 **Proyeksi *Transverse Mercator***

zona, faktor skala dan sistem koordinat (Gambar 2.7). Proyeksi ini pertama kali digunakan oleh Amerika Serikat di awal tahun 1950-an untuk keperluan militer negara-negara NATO sebagai sistem proyeksi peta yang seragam untuk seluruh dunia kecuali di daerah kutub. Beberapa karakteristik dari proyeksi *Universal Transverse Mercator* adalah:

- Elipsoid referensi yang digunakan terserah pemakai, yang terbagi dalam 60 zona, dengan lebar setiap zona 6°.
- Penomoran zona, dimulai dari 180° BB (Bujur Barat) terus ke Timur sampai 180° BT (Bujur Timur).
- Wilayah pemakaian meliputi 84° LU (Lintang Utara) sampai 80° LS (Lintang Selatan).
- Untuk koordinat proyeksi ditetapkan sumbu-X sebagai proyeksi lintang nol (ekuator) dan sumbu-Y sebagai proyeksi dari meridian sentral di setiap zona yang disebut dengan sistem koordinat yang mengacu pada titik nol sejati.
- Koordinat proyeksi UTM biasanya dinyatakan terhadap titik nol semu, dengan $X_{SEMU} = X_{SEJATI} + 500{,}000$ m dan $Y_{SEMU} = Y_{SEJATI}$ untuk belahan bumi Utara dan $Y_{SEMU} = Y_{SEJATI} + 10{,}000{,}000$ m untuk belahan bumi Selatan (Gambar 2.8).
- Konsep titik nol semu ini digunakan agar tidak ada koordinat berharga negatif.
- Faktor skala di meridian sentral = 0.9996.



Gambar 2.7 **Pembagian zona proyeksi *Universal Transverse Mercator***



Gambar 2.8 **Sketsa zona sistem koordinat bidang proyeksi *Universal Transverse Mercator***

B. PENENTUAN POSISI DI LAUT

oleh: Ir. Samsul Bachri, MEng., PhD.

Posisi suatu titik di atas bidang datar dapat ditentukan dengan kombinasi (perpotongan) dua atau lebih garis posisi (*Line of Position* - LOP). LOP adalah lokasi atau keberadaan titik-titik dari suatu pengamat yang memiliki satu besaran pengamatan tetap (dari titik referensi ke titik yang ditentukan posisinya) yang dapat berupa: arah, jarak, sudut atau beda jarak. Di atas permukaan laut, besaran pengamatan tetap tersebut diperoleh menggunakan instrumen-instrumen pengukuran yang bekerja dengan memanfaatkan prinsip-prinsip optik (cahaya tampak) atau elektronik (gelombang radio).

a. Geometri Garis Posisi

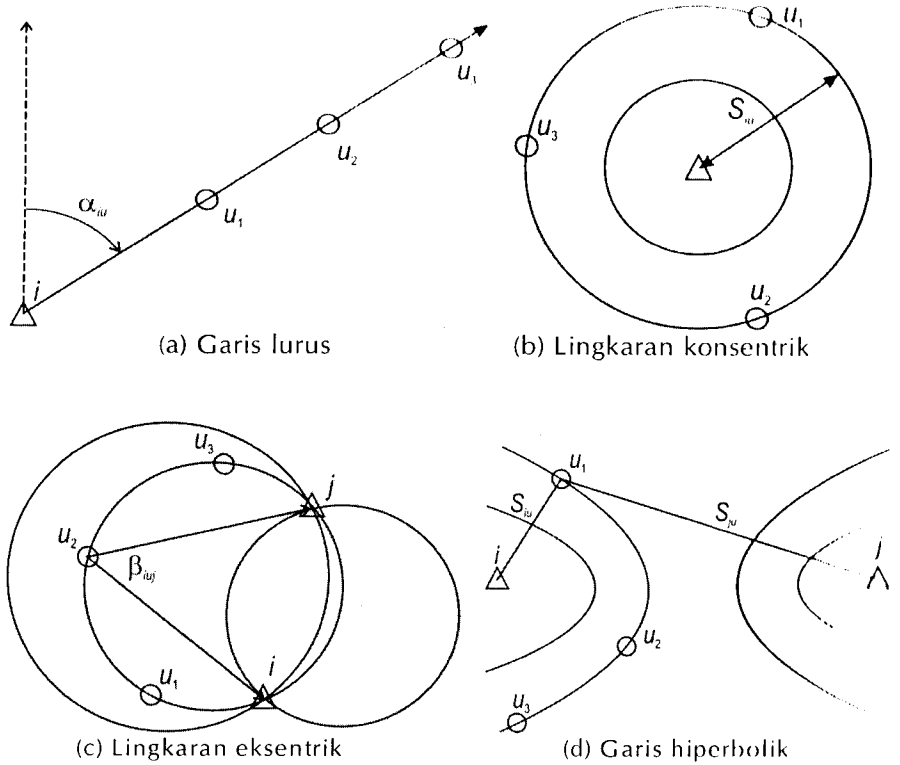
Besaran pengamatan tetap pada setiap LOP memberikan geometri garis-garis posisi: garis lurus, lingkaran konsentrik, lingkaran eksentris dan hiperbolik. Gambar 2.9 memperlihatkan masing-masing geometri garis posisi tersebut, sedangkan model-model matematika untuk masing-masing besaran pengamatan dari suatu garis posisi didokumentasikan pada Lampiran B. Berikut ini diberikan penjelasan lebih jauh tentang empat geometri garis posisi.

Garis Lurus

Jika *i* adalah pengamat yang menjadi referensi dan ditetapkan satu acuan arah yang didefinisikan sebagai 0°, maka titik-titik u_1, u_2, u_3, ..., u_n berada pada garis sepanjang *iu* pada arah α_{iu}. Posisi *u* berada pada LOP garis lurus yang diamati arahnya dari satu titik referensi (Gambar 2.9a). Pada sistem koordinat kartesian dua dimensi, dengan arah 0° sebagai sumbu *Y* dan ditetapkan sumbu *X* yang tegak lurus *Y*, maka posisi titik *u* menjadi fungsi dari posisi titik *i* dan pengamatan α_{iu}.

Lingkaran Konsentris

Lingkaran konsentrik adalah lingkaran-lingkaran yang pusatnya bersekutu di satu titik. Jika titik *i* adalah pengamat yang menjadi referensi dan dari *i* ditarik suatu garis sejauh S_{iu}, maka titik-titik u_1, u_2, u_3, ..., u_n berada pada lingkaran yang dibentuk oleh titik *i* sebagai pusat dan jari-jari S_{iu}. Posisi *u* berada pada LOP lingkaran yang diamati jaraknya dari satu titik referensi (Gambar 2.9b). Pada sistem koordinat kartesian dua dimensi, dengan



Gambar 2.9 **Garis posisi**

arah 0° sebagai sumbu *Y* dan ditetapkan sumbu *X* yang tegak lurus *Y*, maka posisi titik *u* merupakan fungsi dari posisi titik *i* dan pengamatan S_{iu}.

Lingkaran Eksentrik

Lingkaran eksentrik adalah lingkaran-lingkaran yang melewati dua titik. Jika titik *i* dan titik *j* adalah pengamat yang menjadi referensi, maka titik-titik u_1, u_2, u_3, ..., u_n berada pada garis sepanjang lingkaran yang terbentuk oleh titik-titik *i*, *j* dan *u*. Posisi *u* berada pada LOP lingkaran eksentrik dari dua titik referensi (Gambar 2.9c). Pada sistem koordinat kartesian dua dimensi, dengan arah 0° sebagai sumbu *Y* dan ditetapkan sumbu *X* yang tegak lurus *Y*, maka posisi titik *u* adalah fungsi dari posisi titik *i*, titik *j* dan sudut pengamatan β_{iuj}.

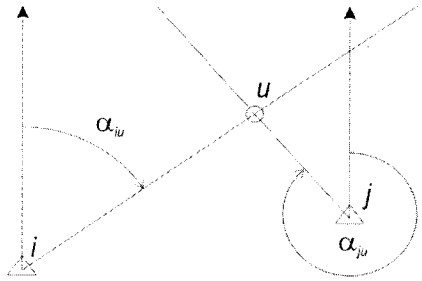
Hiperbolik

Garis-garis hiperbolik adalah garis-garis yang terbentuk oleh titik-titik yang selisih jaraknya ke dua titik lain konstan. Jika titik *i* dan titik *j* adalah pengamat yang menjadi referensi, maka titik-titik u_1, u_2, u_3, ..., u_n berada pada sepanjang garis hiperbolik yang dibentuk oleh titik-titik yang selalu tetap selisih jaraknya ke titik *i* dan titik *j*. Posisi titik *u* ditentukan berada pada LOP hiperbolik dari dua titik referensi (Gambar 2.9d). Pada sistem koordinat kartesian dua dimensi, dengan arah 0° sebagai sumbu *Y* dan ditetapkan sumbu *X* yang tegak lurus *Y*, maka posisi titik *u* menjadi fungsi dari posisi titik *i*, titik *j* dan pengamatan jarak S_{iu} dan S_{ju}.

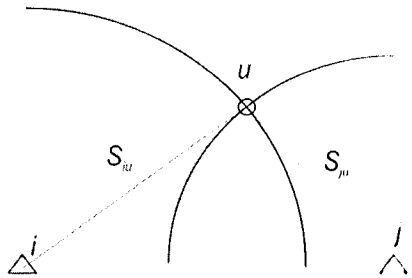
b. Penentuan Posisi Berbasis Garis Posisi

Kombinasi (perpotongan) LOP untuk penentuan posisi suatu titik di atas bidang datar dapat diperoleh dengan pasangan LOP garis lurus (kombinasi pengamatan arah), lingkaran konsentrik (kombinasi pengamatan jarak), lingkaran eksentrik (kombinasi pengamatan sudut) dan hiperbolik (kombinasi pengamatan selisih jarak). Visualisasi masing-masing pasang garis posisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.10 dengan keterangan lebih lanjut sebagai berikut:

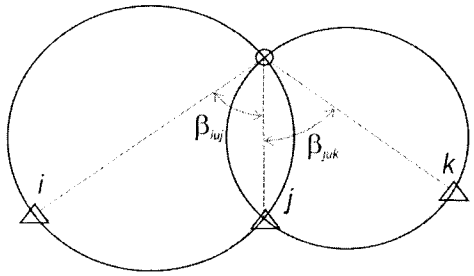
1. Perpotongan LOP garis lurus: posisi *u* diperoleh dengan mengukur arah-arah α_{iu} dan α_{ju} dari dua buah titik ikat (referensi) *i* dan *j* di pantai. Dari perpotongan kedua garis lurus (pengamatan arah) tersebut dapat diperoleh posisi titik *u* (Gambar 2.10a). Pengukuran arah biasanya dilakukan menggunakan teodolit kompas.
2. Perpotongan LOP lingkaran konsentrik: posisi *u* diperoleh dari minimal dua titik referensi *i* dan *j* yang diketahui posisinya dan pengamatan jarak-jarak horisontal S_{iu} dan S_{ju}. Posisi titik *u* ditentukan dari perpotongan dua jarak terhadap titik referensi tersebut (Gambar 2.10b). Jarak horisontal dapat diperoleh dengan memanfaatkan cahaya tampak (menggunakan *substence bar*), gelombang radio (mengukur beda fase atau beda pulsa) atau sinar laser.
3. Perpotongan LOP lingkaran eksentrik atau disebut juga metode perpotongan sudut (*resection*): posisi titik *u* diketahui dari minimal tiga titik referensi *i*, *j* dan *k* yang koordinat-koordinatnya diketahui. Koordinat titik *u* ditentukan dari perpotongan antara dua sudut β_{iuj} dan β_{juk} yang diukur dari *u* terhadap ketiga titik referensi tersebut (Gambar 2.10c) Sudut dapat diukur secara optik dengan sekstan atau dengan alat elektro optik *rotating laser beam*.
4. Perpotongan LOP hiperbolik: Posisi titik *u* diketahui dari minimal tiga titik referensi *i*, *j* dan *k*. Posisi titik *u* ditentukan dari perpotongan antara LOP yang mempunyai beda jarak ΔS_1 ($\Delta S_1 = |S_{iu} - S_{ju}|$ konstan) dan ΔS_2 ($\Delta S_2 = |S_{iu} - S_{ju}|$ = konstan) yang sama antara titik referensi (disebut: *master*) dengan titik ikat penunjang (disebut: *slave*) (Gambar 2.10d). Kombinasi LOP ini dipakai dalam penentuan posisi menggunakan gelombang radio. Beda jarak diperoleh dengan mengukur beda pulsa antara ketiga titik tersebut.



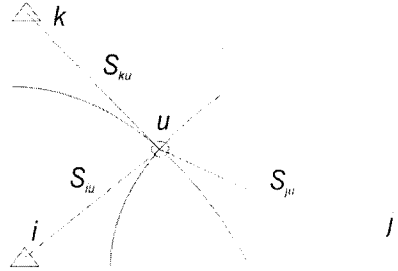
(a) Perpotongan garis lurus-garis lurus



(b) Perpotongan lingkaran konsentrik



(c) Perpotongan lingkaran eksentris

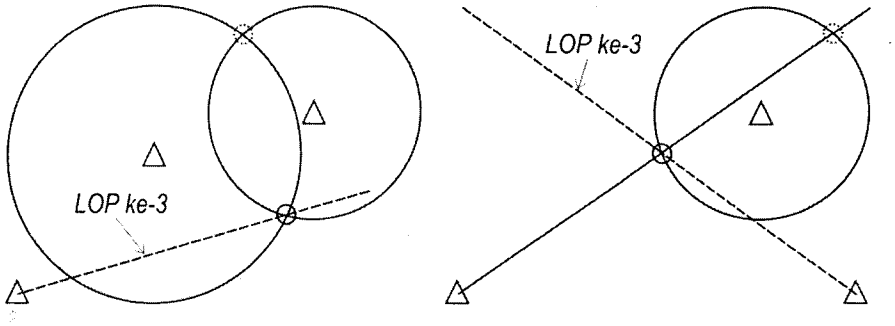


(d) Perpotongan hiperbola

Gambar 2.10 **Geometri konfigurasi penentuan posisi**

Selain empat pasang LOP seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10, secara teoretik, enam kombinasi LOP lainnya dapat diperoleh dari empat jenis geometri LOP. Contoh kombinasi LOP tersebut misalnya: LOP garis lurus dan LOP lingkaran konsentrik (kombinasi pengamatan arah dan jarak), LOP garis lurus dan LOP lingkaran eksentrik (kombinasi pengamatan arah dan sudut) dan sebagainya. Estimasi ketelitian penentuan posisi dengan kombinasi garis posisi didokumentasikan dalam Lampiran C.

Pada kondisi tertentu, kombinasi LOP belum cukup memberikan posisi definitif. Kombinasi dua LOP lingkaran konsentrik memberikan dua titik potong yang belum memberikan kepastian posisi titik yang akan ditentukan. Demikian pula halnya pada kombinasi LOP garis lurus dan lingkaran konsentrik. Pada suatu keadaan tertentu ke dua LOP tersebut dapat menghasilkan dua titik potong (Gambar 2.11). Kejadian ini diistilahkan dengan *LOP ambiguity* atau keraguan garis posisi. Untuk mengatasi persoalan tersebut perlu ditambahkan satu LOP sehingga penentuan posisi dilakukan menggunakan lebih dari dua LOP.



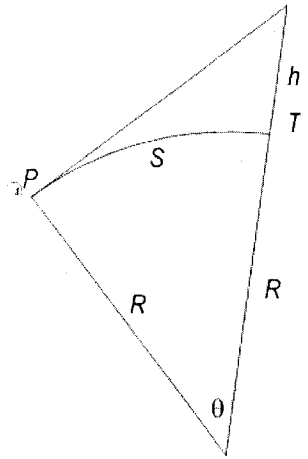
Gambar 2.11 **Keraguan garis posisi**

c. Teknik Penentuan Posisi secara Optik

Penentuan posisi secara optik dilakukan dengan teodolit (*theodolit*). Berkas cahaya pada garis bidik instrumen menggantikan garis-garis pengamatan. Jenis kombinasi LOP yang dapat diterapkan dengan metode ini adalah garis lurus (pengamatan arah), lingkaran konsentrik (pengamatan jarak) dan lingkaran eksentrik (pengamatan sudut). Metode optik murni hanya memanfaatkan berkas sinar tampak sebagai pengganti garis pengamatan. Instrumen elektronik dipakai bersama-sama dengan instrumen optik

menghasilkan metode pengukuran secara elektro optik atau optik hibrid. Instrumen elektronik digunakan untuk melakukan pengukuran jarak dengan memanfaatkan laser atau gelombang elektromagnetik atau gelombang radio. Instrumen untuk penentuan posisi secara optik dan elekto-optik umumnya digunakan untuk pengukuran daerah pesisir dengan jangkauan antara 200 meter hingga 5 kilometer dari garis pantai.

Penggunaan metode optik untuk penentuan posisi menuntut target yang harus terlihat dari pengamat. Faktor-faktor dominan yang membatasi kemampuan pengamat untuk melihat target adalah kelengkungan bumi dan refraksi. Jika lukisan jalannya berkas cahaya diasumsikan berupa garis lurus, maka untuk penggunaan instrumen optik di permukaan bumi yang melengkung akan terjadi kondisi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.12. Fenomena yang disebut dengan keterbatasan garis penglihatan (*line of sight*) ini merupakan akibat melengkungnya permukaan bumi.



Gambar 2.12 **Garis pengamatan pada permukaan melengkung**

Pengamat di titik P akan melihat target di T yang berjarak S pada ketinggian h. Artinya, semakin jauh S (jarak pengamat ke target) semakin besar pula h. Hubungan ini dinyatakan dengan:

$$\cos\theta = \frac{R}{R + h} \qquad (2.1)$$

dengan R = jari-jari bumi dan S didekati dengan $R\theta$. Walaupun demikian,

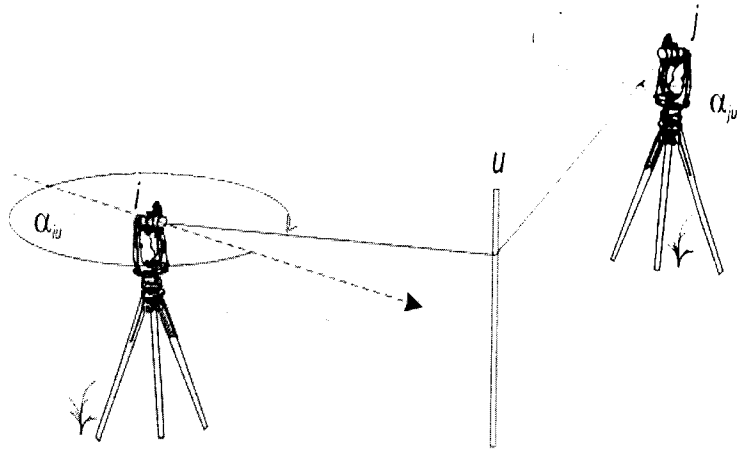
efek kelengkungan bumi hanya memberi pengaruh kecil pada kemampuan alat ukur optik karena kebanyakan instrumen optik memiliki keterbatasan jangkauan pandang, sehingga hanya dapat dipakai pada daerah sempit di atas permukaan bumi yang dapat dianggap sebagai bidang datar. Selain efek kelengkungan bumi, penentuan posisi optik dipengaruhi pula oleh efek refraksi (pembiasan) yang disebabkan oleh perbedaan densitas atmosfer (yang menjadi medium rambat cahaya tampak) karena variasi suhu, tekanan dan kelembapan udara. Refraksi akan 'membelokkan' berkas sinar yang dipakai sebagai garis pengamatan. Pengaruh refraksi direduksi dengan prosedur pengukuran. Teknik-teknik reduksi kesalahan pengukuran optik lebih jauh dapat dilihat di Davis et al. (1981)

Metode Optik Murni

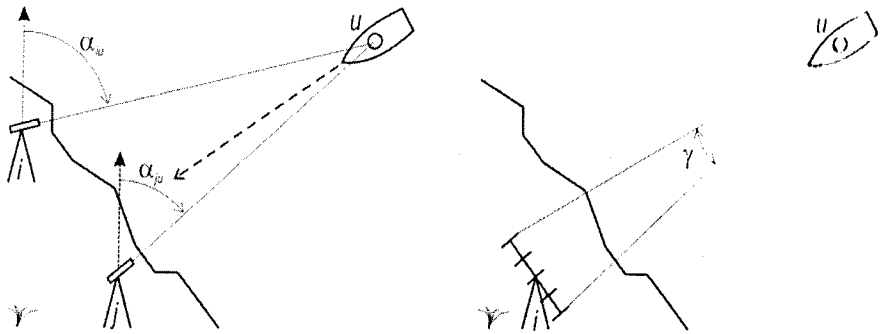
Metode penentuan posisi secara optik murni mengaplikasikan kombinasi LOP garis lurus, lingkaran konsentrik dan lingkaran eksentrik. Gambar 2.13 memperlihatkan penggunaan dua teodolit kompas untuk mengukur arah-arah α_{iu} dan α_{ju} dari titik-titik referensi *i* dan *j* ke titik *u*. Teknik ini disebut dengan *theodolit tracking* (Gambar 2.14a). Pengukuran jarak dapat pula dilakukan dengan cara optik murni menggunakan teknik *sextant-substence bar*. Jarak diperoleh dengan mengukur sudut γ yang dibentuk oleh posisi kapal dengan ujung-ujung lengan *substence bar* (Gambar 2.14b). Jika panjang lengan *substence bar* diketahui maka jarak pengamat *u* ke titik referensi *i* dapat dihitung. Posisi diperoleh dengan pengamatan dua jarak ke dua titik referensi. Selain itu, metode optik murni dapat pula dipakai untuk melakukan pengukuran sudut. Pengukuran tersebut dilakukan dengan teknik sekstan yang dilakukan dengan mengukur sudut yang dibentuk oleh kapal dengan dua titik referensi di darat (Gambar 2.14c). Posisi diperoleh dengan pengamatan dua sudut ke tiga titik referensi.

Metode Elektro-optik

Instrumen elektro-optik terutama dipakai untuk mengaplikasikan kombinasi LOP lingkaran konsentrik (pengamatan jarak). Gambar 2.15 memperlihatkan penggunaan sistem Polarfix dari Atlas untuk mengukur jarak dan arah dari titik-titik referensi di pantai ke kapal di laut yang ditentukan posisinya. Posisi diperoleh dengan kombinasikan pengukuran jarak secara elektronik (dengan gelombang radio) dan pengukuran arah (sudut) dengan cara optik. Pada titik yang ditentukan posisinya ditempatkan *reflector* dan pada titik referensi di darat ditempatkan alat elektro optik.



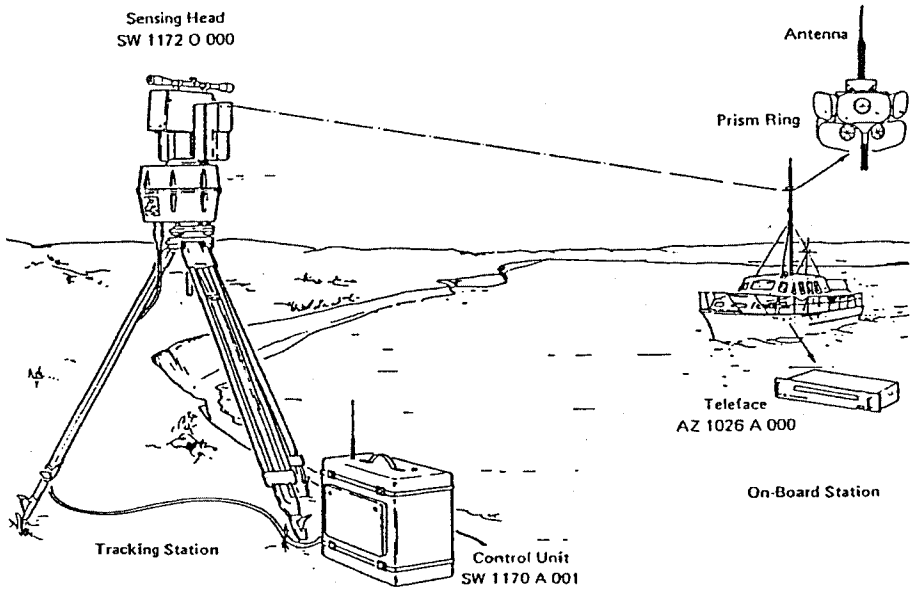
Gambar 2.13 **Penentuan posisi *u* dengan perpotongan arah di *i* dan *j***



Gambar 2.14 **Pengukuran arah, jarak dan sudut secara optik**

Metode Elektro-optik

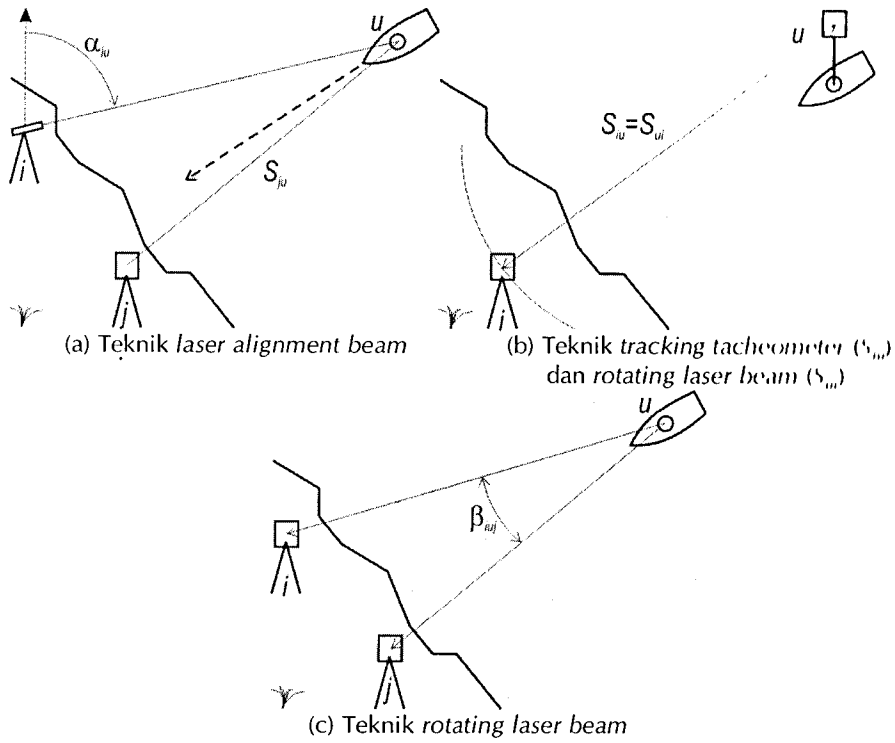
Instrumen elektro-optik terutama dipakai untuk mengaplikasikan kombinasi LOP lingkaran konsentrik (pengamatan jarak). Gambar 2.15 memperlihatkan penggunaan sistem Polarfix dari Atlas untuk mengukur jarak dan arah dari titik-titik referensi di pantai ke kapal di laut yang ditentukan posisinya. Posisi diperoleh dengan kombinasikan pengukuran jarak secara elektronik (dengan gelombang radio) dan pengukuran arah (sudut) dengan cara optik. Pada titik yang ditentukan posisinya ditempatkan *reflector* dan pada titik referensi di darat ditempatkan alat elektro optik.



Gambar 2.15 **Penentuan posisi *u* dengan perpotongan arah dan jarak dari titik referensi (sumber: Krupp Atlas)**

Pengamatan jarak dapat pula diperoleh dengan teknik-teknik pengukuran *laser alignment beam, tracking tacheometer* dan *rotating laser beam*. Dengan teknik *laser alignment beam*, pengamatan jarak S_{ju} secara elektronik dilakukan dengan bantuan reflektor di titik referensi *j* (Gambar 2.16a). Teknik *tracking tacheometer* dilakukan untuk mengukur jarak S_{iu} atau S_{ui} dengan bantuan reflektor optik di kapal yang ditentukan posisinya (Gambar 2.16b). *Tacheometer* adalah suatu sistem pengukur jarak dengan gelombang elektromagnetik. Teknik *rotating laser beam* dapat pula dipakai untuk

melakukan pengukuran sudut dengan sapuan gelombang elektromagnetik pada bidang datar (Gambar 2.16c). Sudut β_{iuj} yang dibentuk oleh kapal dan titik-titik referensi *i* dan *j* di darat dideteksi dengan bantuan reflektor-reflektor. Gelombang yang dipantulkan kembali akan dideteksi oleh alat ini dan dipakai untuk memberi tanda arah-arah (relatif dari kapal) reflektor *i* dan *j*. Sudut yang dibentuk merupakan selisih arah *i* terhadap *j*.



Gambar 2.16 **Pengukuran jarak dan sudut secara optik-hibrid**

d. Penentuan Posisi secara Elektronik

Penggunaan gelombang elektromagnetik untuk mendapatkan besaran pengamatan jarak merupakan prinsip penting dalam penentuan posisi elektronik. Metode penentuan posisi yang digunakan adalah kombinasi LOP lingkaran konsentrik (pengukuran jarak) dan hiperbolik (pengukuran selisih jarak). Pengukuran jarak tidak dilakukan secara langsung melainkan diperoleh dengan mengenali laju gelombang elekromagnetik pada medium atmosfer dan selang waktu sejak gelombang dipancarkan dari pengamat sampai dengan

saat diterima oleh target. Instrumen elektronik digunakan untuk mengukur jarak yang relatif jauh, yang tidak dapat dijangkau oleh instrumen optik. Gelombang elektromagnetik memiliki spektrum yang sangat luas. Tabel 2.1 memperlihatkan spektrum gelombang elektromagnetik menurut panjang gelombang (λ) dan frekuensinya (f).

Tabel 2.1 Spektrum gelombang elektromagnetik

f (Hz)	λ (cm)	GELOMBANG
$\geq 3\times10^{15}$M	$\geq 3.10^{-10}$	Radiasi kosmik
$3\times10^{8}-3\times10^{15}$M	$3\times10^{-10}-3\times10^{-3}$	Sinar-X, gamma, ultra violet, cahaya tampak
$3\times10^{6}-3\times10^{8}$M	$0.01-3\times10^{-3}$	Infra merah
$30000-3\times10^{5}$M	1–0.01	*Extra High Frequency* (EHF)
3000–30000M	10–1	*Super High Frequency* (SHF)
300–3000M	$1\times10^{2}-10$	*Ultra High Frequency* (UHF)
30–300M	$1\times10^{3}-1\times10^{2}$	*Very High Frequency* (VHF)
3–30M	$1\times10^{4}-1\times10^{3}$	*High Frequency* (HF)
300k–3M	$1\times10^{5}-1\times10^{4}$	*Medium Frequency* (MF)
30–300k	$1\times10^{6}-1\times10^{5}$	*Low Frequency* (LF)
3–30k	$1\times10^{7}-1\times10^{6}$	*Very Low Frequency* (VLF)

Gelombang elektromagnetik dengan frekuensi 3 hingga 3×10^{6} MHz tergolong gelombang radio dan gelombang mikro. Beberapa sistem navigasi dan penentuan posisi elektronik memanfaatkan gelombang elektromagnetik pada rentang frekuensi ini. Sistem navigasi Omega menggunakan VLF, sistem Decca dan Loran C menggunakan LF, sistem *radiobeacons* menggunakan LF dan MF, sistem NAVSAT menggunakan VHF dan UHF, sistem NAVSTAR menggunakan UHF, sedangkan sistem RADAR menggunakan UHF, SHF dan VHF.

Pengukuran Jarak secara Elektronik

Pengukuran jarak secara elektronik dilakukan dengan metode-metode *two way ranging*, *one way ranging* atau *range difference*. Teknik *two way ranging* dilakukan dengan satu instrumen pemancar gelombang yang disebut dengan *master* dan satu instrumen pemantul gelombang yang disebut dengan *remote* atau reflektor. Pengukuran selang waktu dilakukan oleh jam pada *master* yang mengukur selang waktu sejak gelombang meninggalkan

master, dipantulkan oleh *remote* dan diterima kembali oleh *master*. Teknik ini dapat dipakai untuk melakukan penentuan posisi dengan melakukan pengukuran jarak-jarak yang relatif pendek dengan sistem alat antara lain *Electronic Distance Meter* (EDM) atau EODM (*Electro Optic Distance Meter*).

Teknik *one way ranging* dilakukan dengan menggunakan satu instrumen pemancar yang disebut dengan *transmitter* dan satu instrumen penerima yang disebut dengan *receiver*. Pada sistem ini pemancar disebut sebagai unit aktif dan penerima disebut sebagai unit pasif. Pengukuran selang waktu dilakukan oleh jam pada *receiver* yang mengukur selang waktu sejak gelombang meninggalkan *transmitter* hingga diterima oleh *receiver*. *Phase discriminator* di *receiver* mendeteksi saat gelombang diterima dan membandingkannya dengan saat gelombang dipancarkan untuk memperoleh informasi selang waktu. Pada sistem ini, jam pada *transmitter* harus sama dengan jam pada *receiver*, karena kesalahan pengukuran selang waktu sebesar 1ms mengakibatkan kesalahan pengukuran jarak hingga 300 m. Teknik ini dapat dipakai untuk melakukan penentuan posisi dengan melakukan pengukuran jarak-jarak menengah. Sistem navigasi dan penentuan posisi yang menggunakan teknik ini misalnya adalah Hi-Fix dan Decca.

Teknik *range differencing* dilakukan dengan menggunakan dua atau lebih instrumen pemancar gelombang yang disebut dengan *transmitter* (*master*) dan dua instrumen penerima gelombang dari master yang disebut *slaves*. *Master* dan *slaves* ditempatkan pada titik-titik referensi. *Master* mengirimkan sinyal ke *slave* pertama dan kedua yang melakukan pengukuran selang waktu perambatan gelombang dan meneruskan perambatan gelombang ke *receiver* di kapal (titik yang ditentukan posisinya). Beda waktu atau beda fase dari sinyal yang diterima dari dua *slaves* diukur di *receiver* sehingga beda jarak ke *master* dan *slave* pertama serta *slave* kedua dapat ditentukan. Sistem penentuan posisi Loran C dikembangkan dengan teknik ini. Sistem lain yang juga memanfaatkan teknik ini adalah Omega dan satelit Doppler.

Pemanfaatan Gelombang Radio

Hingga kini, gelombang radio mempunyai sejarah yang panjang dalam penentuan posisi di laut. Metode penentuan posisi yang digunakan umumnya kombinasi LOP lingkaran konsentrik (pengamatan jarak). Gelombang radio yang digunakan dalam pengukuran jarak elektronik dapat diklasifikasikan berdasarkan frekuensinya yaitu *Ultra High Frequency* (UHF), *Medium Frekuensi* (MF) serta *Low Frequency* (LF) dan *Very Low Frequency* (VLF). Penentuan posisi dengan frekuensi tinggi digunakan untuk pengukuran jarak

dengan jangkauan sekitar 30 km. Pada kondisi cuaca yang baik beberapa sistem dapat mengukur jarak sampai 100 km. Contoh sistem ini misalnya: Syledis, Miniranger, Trisponder, Microfix dan Autotape.

Penentuan posisi ini menggunakan gelombang menengah dengan frekuensi antara 1.5 hingga 5 MHz dapat mencapai jarak maksimum antara 150 hingga 1200 km. Pencapaian jarak pengukuran sangat tergantung pada refleksi dari ionosfer dan lintasan gelombang melalui daratan atau lautan. Contoh dari sistem gelombang menengah ini misalnya: Argo, Hi-Fix, Raydist, Geoloc dan Hydrotac. Frekuensi rendah digunakan untuk navigasi di laut lepas dan seluruh dunia yang tidak memerlukan ketelitian tinggi. Sistem Loran C memanfaatkan rentang frekuensi ini (sekitar 100 kHz) untuk menjangkau jarak pengukuran sekitar 1000 km pada siang hari dan sekitar 2000 km pada malam hari. Untuk navigasi dengan jangkauan seluruh dunia, posisinya dapat ditentukan dengan sistem Omega yang menggunakan frekuensi 10 kHz.

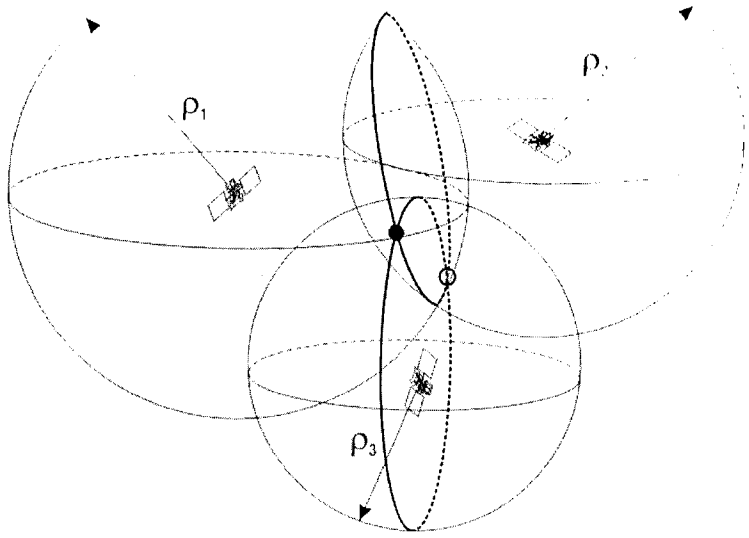
C. PENENTUAN POSISI DENGAN GPS

oleh: Ir. Hasanuddin Z. Abidin, MSc., PHD.

GPS (*Global Positioning System*) adalah sistem satelit navigasi dan penentuan posisi yang dimiliki dan dikelola oleh Amerika Serikat. Sistem ini didesain untuk memberikan posisi dan kecepatan tiga-dimensi serta informasi mengenai waktu, secara kontinyu di seluruh dunia tanpa tergantung waktu dan cuaca, kepada banyak orang secara simultan. Pada saat ini, sistem GPS sudah sangat banyak digunakan orang di seluruh dunia. Di Indonesia pun, GPS sudah banyak diaplikasikan, terutama yang terkait dengan aplikasi-aplikasi yang menuntut informasi tentang posisi.

Prinsip dasar penentuan posisi dengan GPS adalah pengukuran jarak ke beberapa satelit (yang koordinatnya telah diketahui) sekaligus, yang tidak lain merupakan kombinasi dari beberapa permukaan posisi bola konsentrik dalam ruang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17.

Dibandingkan dengan sistem dan metode penentuan posisi lainnya, GPS mempunyai banyak kelebihan dan menawarkan lebih banyak keuntungan, baik dalam segi operasionalisas maupun kualitas posisi yang diberikan. Saat ini ada juga sistem penentuan posisi berbasis satelit yang operasional, yaitu GLONASS yang dimiliki Rusia. Di samping itu, dalam waktu dekat Komunitas Eropa akan meluncurkan sistem satelit GALILEO.



Gambar 2.17 **Prinsip penentuan posisi dengan pengukuran jarak ke tiga satelit**

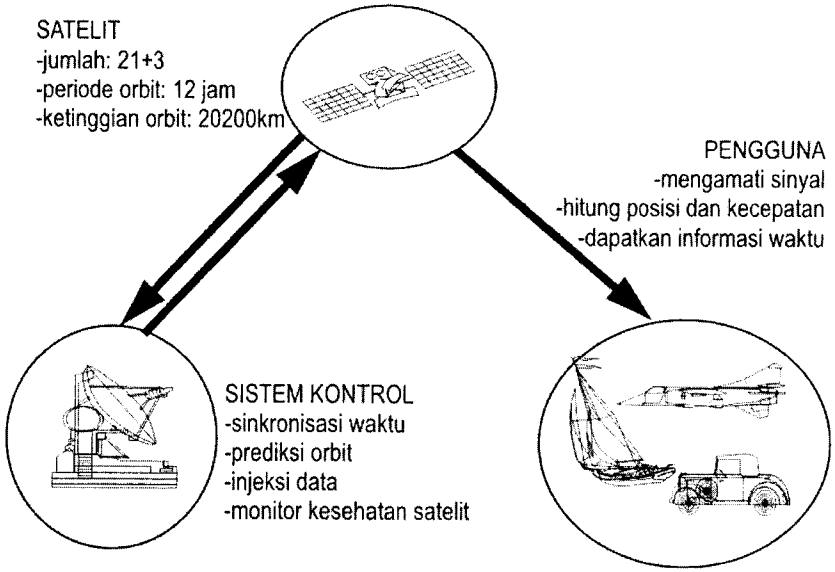
Penjelasan yang lebih detil tentang GPS dan aplikasinya dapat dilihat di Abidin (2000).

a. Karakteristik Sistem GPS

GPS adalah sistem radio navigasi dan penentuan posisi menggunakan satelit. Nama formalnya adalah NAVSTAR GPS, kependekan dari *NAVigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System*. Sistem yang dapat digunakan oleh banyak orang sekaligus dalam segala cuaca ini, didesain untuk memberikan posisi dan kecepatan tiga-dimensi yang teliti serta informasi mengenai waktu secara kontinyu di seluruh dunia. Arsitektur sistem GPS disetujui oleh Departemen Pertahanan Amerika Serikat pada tahun 1973. Satelit pertama diluncurkan pada tahun 1978 dan secara resmi GPS dinyatakan operasional pada tahun 1994.

GPS terdiri atas tiga segmen utama, yaitu: (i) segmen angkasa (*space segment*) yang terdiri dari satelit-satelit GPS, (ii) segmen sistem kontrol (*control system segment*) yang terdiri dari stasiun-stasiun pemonitor dan pengontrol satelit dan (iii) segmen pemakai (*user segment*) yang terdiri dari

pemakai GPS termasuk alat-alat penerima dan pengolah sinyal dan data GPS. Ketiga segmen GPS ini digambarkan secara skematik pada Gambar 2.18.

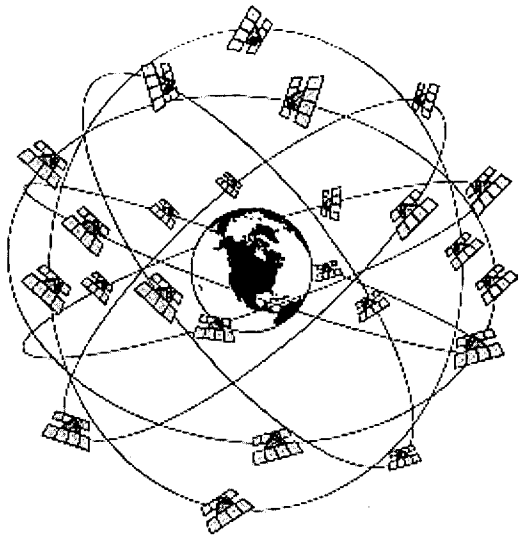


Gambar 2.18 **Sistem penentuan posisi global GPS (Wells et al., 1986)**

Satelit GPS bisa dianalogikan sebagai stasiun radio di angkasa, yang dilengkapi dengan antena-antena untuk mengirim dan menerima sinyal-sinyal gelombang. Sinyal-sinyal ini selanjutnya diterima oleh *receiver* GPS di atau dekat permukaan bumi dan digunakan untuk menentukan posisi, kecepatan maupun waktu. Selain itu, satelit GPS juga dilengkapi dengan peralatan untuk mengontrol 'tingkah-laku' (*attitude*) satelit serta sensor-sensor untuk mendeteksi peledakan nuklir dan lokasinya.

Konstelasi standar satelit GPS terdiri dari 24 satelit yang menempati enam bidang orbit yang bentuknya sangat mendekati lingkaran, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.19. Orbit satelit GPS berinklinasi 55° terhadap bidang ekuator dengan ketinggian rata-rata dari permukaan bumi sekitar 20,200 km. Satelit GPS bergerak dalam orbitnya dengan kecepatan kira-kira 3.87 km/s dan mempunyai periode 11 jam dan 58 menit (sekitar 12 jam). Dengan adanya 24 satelit yang mengangkasa tersebut, 4 sampai 10 satelit GPS akan selalu dapat diamati pada setiap waktu darimana pun di permukaan bumi. Saat ini (Januari 2005), karena adanya 6 satelit GPS generasi awal

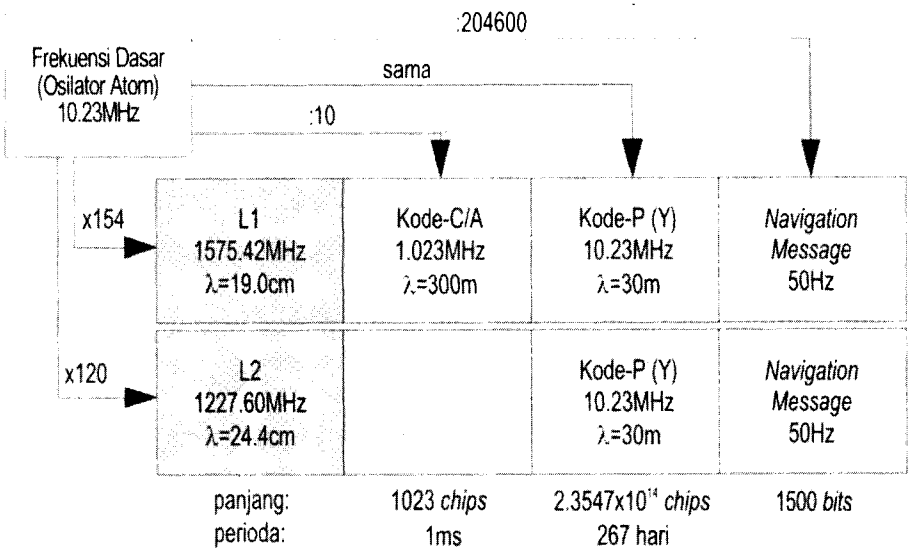
yang masih sehat, ada 30 satelit Blok II GPS yang operasional dan dapat digunakan untuk penentuan posisi serta aplikasi-aplikasi lainnya.



Gambar 2.19 **Konfigurasi orbit satelit GPS**

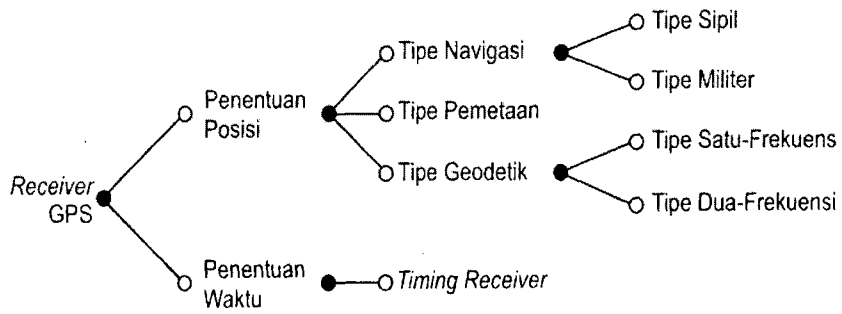
Setiap satelit GPS secara kontinyu memancarkan sinyal-sinyal gelombang pada dua frekuensi L-*band* yang dinamakan L1 and L2. Sinyal L1 berfrekuensi 1575.42 MHz dan sinyal L2 berfrekuensi 1227.60 MHz. Sinyal L1 membawa 2 buah kode biner yang dinamakan kode-P (*P-code*; *P = Precise* atau *Private*) dan kode-C/A (*C/A-code*; *C/A = Clear Access* atau *Coarse Acquisation*), sedangkan sinyal L2 hanya membawa kode-C/A. Saat ini kode-P telah diubah menjadi kode-Y yang strukturnya dirahasiakan untuk umum. Jadi, saat ini kode yang dipancarkan oleh satelit-satelit GPS adalah kode-C/A dan kode-P (Y).

Dengan mengamati sinyal-sinyal dari satelit dalam jumlah dan waktu yang cukup, seseorang kemudian dapat memprosesnya untuk mendapatkan informasi mengenai posisi, kecepatan dan waktu ataupun parameter-parameter turunannya. Sinyal GPS dibagi atas tiga komponen, yaitu: (i) penginformasi jarak (kode) yang berupa kode-P dan kode-C/A, (ii) penginformasi posisi satelit (*navigation message*) dan (iii) gelombang pembawa (*carrier wave*) L1 dan L2. Struktur frekuensi dan karakteristik dasar dari ketiga komponen sinyal GPS tersebut diberikan pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20 **Struktur frekuensi dan parameter dasar komponen sinyal GPS**

Untuk dapat menerima dan memproses sinyal-sinyal yang dipancarakan dari satelit GPS yang selanjutnya digunakan dalam penentuan posisi, kecepatan maupun waktu, diperlukan alat penerima sinyal GPS (GPS *receiver*). *Receiver* GPS untuk penentuan posisi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.21, dapat dibagi atas *receiver* tipe navigasi, tipe pemetaan dan tipe geodetik. *Receiver* tipe navigasi (*navigation type*) yang kadang disebut tipe genggam (*handheld receiver*) umumnya digunakan untuk penentuan posisi absolut secara instan yang tidak menuntut ketelitian terlalu tinggi. *Receiver* navigasi tipe sipil dapat memberikan ketelitian posisi sekitar 5 hingga 10 meter dan tipe militer sekitar 3 hingga 5 meter.



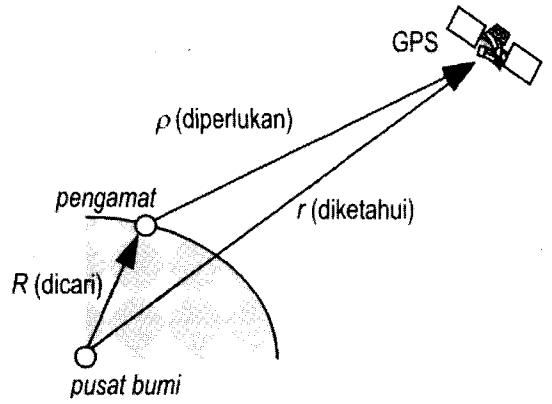
Gambar 2.21 **Klasifikasi *receiver* GPS (Abidin, 2000)**

Receiver GPS tipe pemetaan umumnya digunakan untuk aplikasi-aplikasi yang menuntut ketelitian beberapa dm, seperti: survei dan pemetaan geologi dan pertambangan, peremajaan peta, serta pembangunan dan peremajaan basis data Sistem Informasi Geografi (SIG). Sedangkan *receiver* tipe geodetik umumnya digunakan untuk aplikasi-aplikasi yang menuntut ketelitian yang relatif tinggi (dari orde mm sampai cm), seperti untuk pengadaan titik-titik kontrol geodesi, pemantauan deformasi dan studi geodinamika.

b. Metode Penentuan Posisi dengan GPS

Konsep dasar penentuan posisi dengan GPS adalah reseksi (pengikatan ke belakang) dengan jarak, yaitu dengan pengukuran jarak secara simultan ke beberapa satelit GPS yang koordinatnya telah diketahui. Secara vektor, prinsip dasar penentuan posisi dengan GPS diperlihatkan pada Gambar 2.22. Dalam hal ini, parameter yang akan ditentukan adalah vektor posisi geosentrik pengamat (R). Untuk itu, karena vektor posisi geosentrik satelit GPS (r) telah diketahui, maka yang perlu ditentukan adalah vektor posisi toposentris satelit terhadap pengamat (ρ):

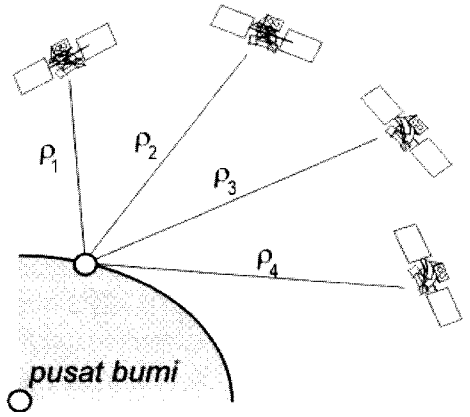
$$R = r - \rho \qquad (2.2)$$



Gambar 2.22 **Prinsip dasar penentuan posisi dengan GPS (pendekatan vektor)**

Pada pengamatan dengan GPS, yang bisa diukur hanyalah *jarak* antara pengamat dengan satelit dan bukan vektornya, oleh sebab itu Persamaan 2.2 tidak dapat diterapkan. Untuk mengatasi hal ini, penentuan posisi pengamat dilakukan dengan melakukan pengamatan terhadap beberapa satelit sekaligus secara simultan, dan tidak hanya terhadap satu satelit, seperti

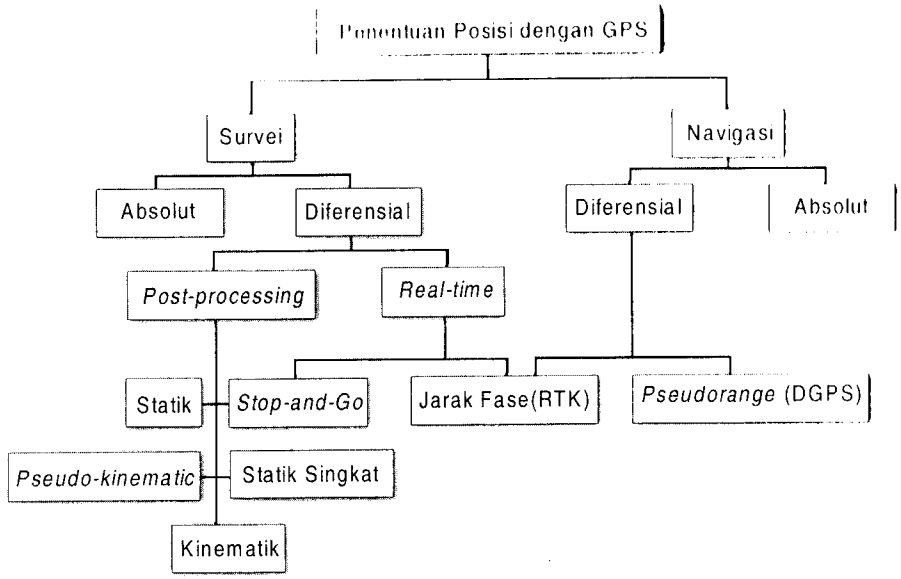
yang ditunjukkan pada Gambar 2.23. Pada operasionalisasinya, prinsip penentuan posisi dasar dengan GPS tergantung pada mekanisme pengaplikasiannya dan dapat diklasifikasikan atas beberapa metode penentuan posisi yang akan dijelaskan lebih lanjut pada sub-bab berikutnya.



Gambar 2.23 **Prinsip dasar penentuan posisi dengan GPS**

Posisi yang diberikan oleh GPS adalah posisi tiga-dimensi (X, Y, Z ataupun φ, λ, h) yang dinyatakan dalam datum WGS-1984. Dengan GPS, titik yang akan ditentukan posisinya dapat diam (*static positioning*) ataupun bergerak (*kinematic positioning*). Posisi titik dapat ditentukan dengan menggunakan satu *receiver* GPS terhadap pusat bumi dengan menggunakan metode penentuan posisi absolut, ataupun terhadap titik lainnya yang telah diketahui koordinatnya (stasiun referensi) dengan menggunakan metode diferensial (relatif) yang menggunakan minimal dua *receiver* GPS. GPS dapat pula memberikan posisi secara instan (*real-time*) ataupun sesudah pengamatan setelah data pengamatannya diproses secara lebih ekstensif (*post processing*) yang biasanya dilakukan untuk mendapatkan ketelitian yang lebih baik. Secara umum dikenal beberapa metode dan sistem penentuan posisi dengan GPS, yaitu seperti yang secara skematis ditunjukkan pada Gambar 2.24.

Survei GPS dapat didefinisikan sebagai proses penentuan koordinat dari sejumlah titik terhadap beberapa buah titik yang telah diketahui koordinatnya, dengan menggunakan metode penentuan posisi diferensial serta data pengamatan fase dari sinyal GPS. Pada survei GPS, pengolahan data umumnya dilakukan setelah pengamatan selesai (*post processing*);



Gambar 2.24 **Metode dan sistem penentuan posisi dengan GPS (dimodifikasi dari Langley, 1998)**

meskipun dengan berkembangnya sistem RTK (*Real Time Kinematic*), survei GPS secara *real-time* juga mulai dapat terealisasi.

c. Ketelitian Posisi GPS

Ketelitian posisi yang didapat dengan pengamatan GPS akan tergantung pada empat faktor yaitu: metode penentuan posisi yang digunakan, geometri dan distribusi satelit-satelit yang diamati, ketelitian data yang digunakan dan strategi atau metode pengolahan data yang diterapkan (Tabel 2.2). Cara memperhitungkan dan memperlakukan faktor-faktor tersebut akan mengakibatkan tingkat ketelitian yang berbeda. Karenanya, GPS memberikan ketelitian posisi yang spektrumnya cukup luas, dari tingkat ketelitian tinggi (orde milimeter) hingga tingkat ketelitian sedang (orde meter), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.25.

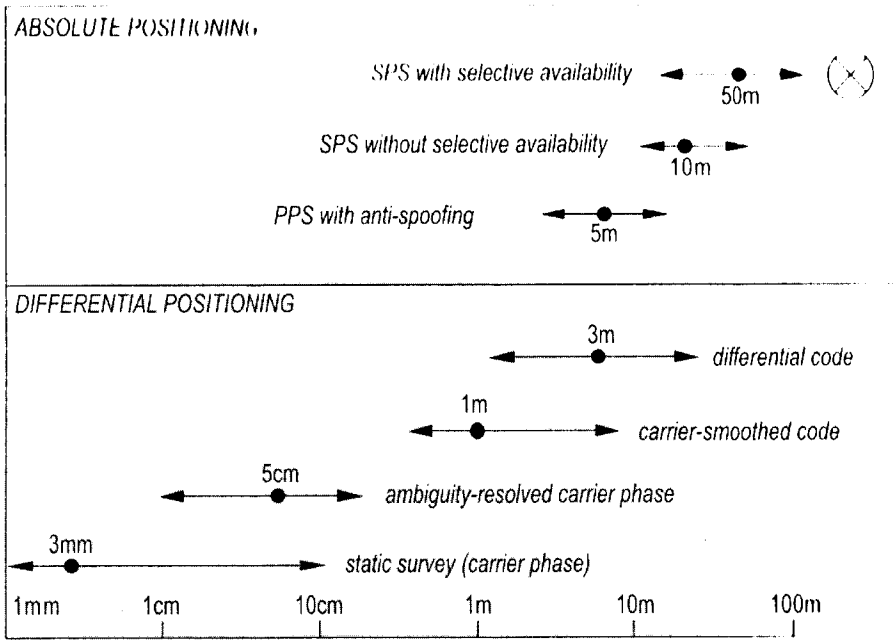
Tabel 2.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi ketelitian penentuan posisi dengan GPS (dimodifikasi dari Abidin, 2000)

FAKTOR	SUMBER
Ketelitian data	• Tipe data yang digunakan • Kualitas receiver • Level dari kesalahan dan bias
Geometri satelit	• Jumlah satelit • Lokasi dan distribusi satelit • Lama pengamatan
Metoda penentuan posisi	• Absolut dan diferensial • Statik, *rapid-static*, *pseudo-kinematic* • *Stop and go*, kinematik • *One and multi-monitor station*
Strategi pemrosesan data	• *Real time* dan *post processing* • Strategi eliminasi dan pengkoreksian kesalahan dan bias • Metode estimasi yang digunakan • Pemrosesan *baseline* dan perataan jaringan • Kontrol kualitas

Sejak 1 Mei 2000, kebijakan SA (*Selective Availability*) sudah ditiadakan, sehingga tingkat ketelitian penentuan posisi *real-time* secara absolut dengan GPS menjadi bertambah baik dari kisaran 50 hingga 100 m menjadi sekitar 5 hingga 10 m. Luasnya spektrum ketelitian posisi yang diberikan oleh GPS ini adalah salah satu keindahan GPS, karena pemakai GPS mempunyai keleluasaan dalam melaksanakan penentuan posisi sesuai dengan tingkat ketelitian yang diperlukan secara optimal dan effisien (baik waktu maupun biaya). Oleh karena itu, GPS dapat melayani cukup banyak aplikasi dengan tuntutan ketelitian yang beragam.

d. Aplikasi Penentuan Posisi GPS dalam Bidang Survei Kelautan

Dalam hal survei dan pemetaan serta penentuan posisi di laut, GPS telah digunakan untuk keperluan survei hidro-oseanografi, survei seismik, penentuan posisi rambu-rambu dan peralatan bantu navigasi serta titik-titik pengeboran minyak lepas pantai, ataupun untuk mempelajari karakteristik arus, gelombang, ataupun pasut di lepas pantai. Bahkan beberapa peneliti



Gambar 2.25 **Spektrum ketelitian posisi GPS (Abidin, 2000)**

di Amerika Serikat juga telah menggunakan GPS, dikombinasikan dengan sistim penentuan posisi akustik, untuk menentukan posisi titik-titik di dasar laut secara teliti, dalam rangka mempelajari dinamika lempeng-lempeng benua di bawah lautan. GPS juga telah digunakan untuk membantu proses pengerukan pelabuhan.

Patut dicatat di sini bahwa sebelum adanya GPS, survei hidro-oseanografi umumnya menggunakan sistem penentuan posisi elektronik yang memanfaatkan gelombang radio seperti Mini Ranger, Polarfix, Syledis, Hyperfix dan Argo untuk mendapatkan informasi tentang posisi. Kadangkala sekstan dan theodolit juga masih digunakan. Satelit Doppler (Transit) juga digunakan oleh beberapa pihak. Saat ini penggunaan GPS dalam survei hidro-oseanografi terutama terkait dengan:

- penentuan posisi titik-titik kontrol di pantai,
- navigasi kapal survei,
- penentuan posisi titik-titik perum (*sounding*),

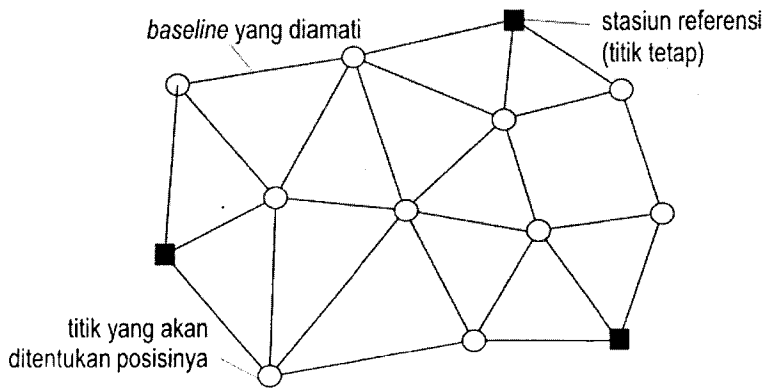
- penentuan posisi sensor-sensor hidrografi dan oseanografi, serta
- penentuan posisi struktur atau objek di laut seperti wahana pengeboran (*rig*).

Dalam kaitannya dengan aktivitas pemetaan laut di atas, metode penentuan posisi yang digunakan umumnya adalah:

1. Metode survei GPS: untuk penentuan posisi titik-titik kontrol di pantai;
2. Metode kinematik diferensial: untuk tahapan lainnya, baik menggunakan data *pseudorange* untuk aplikasi-aplikasi yang menuntut ketelitian menengah (level meter), maupun menggunakan data fase untuk ketelitian yang lebih tinggi (level cm);
3. Sistem DGPS dan RTK; untuk aplikasi-aplikasi yang menuntut informasi posisi secara instan (*real-time*); dimana sistem DGPS umumnya digunakan untuk melayani aplikasi berketelitian menengah dan sistem RTK untuk aplikasi berketelitian lebih tinggi.

Metode Survei GPS

Metode survei GPS pada dasarnya bertumpu pada metode penentuan posisi statik secara diferensial dengan menggunakan data fase. Dalam hal ini, pengamatan satelit GPS umumnya dilakukan *baseline* per *baseline* selama selang waktu tertentu (beberapa menit sampai beberapa jam tergantung tingkat ketelitian yang diinginkan), dalam suatu jaringan (kerangka) dari titik-titik yang akan ditentukan posisinya, seperti contoh yang ditunjukkan pada Gambar 2.26.



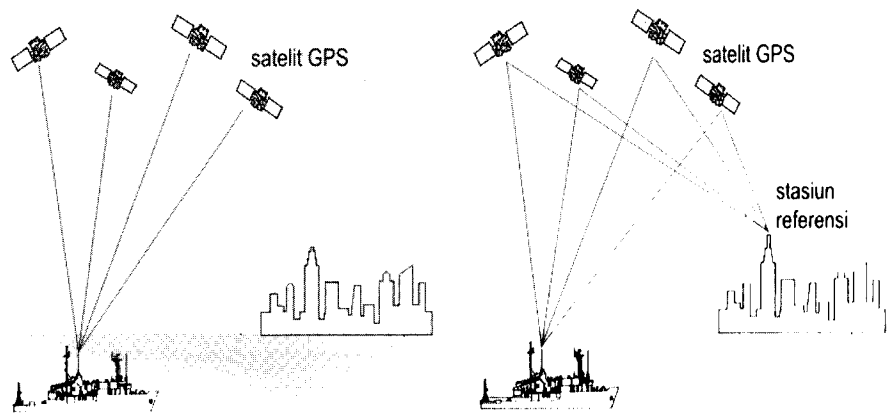
Gambar 2.26 **Penentuan posisi titik-titik dengan metode survei GPS (moda jaringan)**

Seandainya ada lebih dari dua *receiver* GPS yang digunakan, maka pada satu sesi pengamatan (*observing session*) dapat diamati lebih dari satu *baseline* sekaligus. Dalam pelaksanaan survei GPS, selain dengan moda jaringan yang ditunjukkan pada Gambar 2.26 di atas, penentuan posisi titik-titik juga dapat dilakukan dalam moda radial sesuai dengan keperluan.

Proses penentuan koordinat dari titik-titik dalam suatu jaringan dalam survei GPS, terdiri atas tiga tahap, yaitu: (i) pengolahan data dari setiap *baseline* dalam jaringan, (ii) perataan jaringan yang melibatkan semua *baseline* untuk menentukan koordinat dari titik-titik dalam jaringan dan (iii) transformasi koordinat titik-titik tersebut dari datum WGS-84 ke datum yang diperlukan oleh pengguna. Penjelasan lebih detil tentang metode survei GPS ini dapat dilihat dalam Abidin et al. (2002).

Penentuan Posisi secara Kinematik

Penentuan posisi secara kinematik (*kinematic positioning*) adalah penentuan posisi dari titik-titik yang bergerak dan *receiver* GPS tidak dapat atau tidak punya kesempatan untuk berhenti pada titik-titik tersebut, seperti dalam kasus lingkungan laut. Penentuan posisi kinematik ini dapat dilakukan secara absolut ataupun diferensial (lihat Gambar 2.27) dengan menggunakan data *pseudorange* dan/atau fase. Hasil penentuan posisi bisa diperlukan saat pengamatan (*real-time*) ataupun sesudah pengamatan (*post-processing*). Untuk *real-time differentian positioning* diperlukan komunikasi data antara stasiun referensi dengan *receiver* yang bergerak.

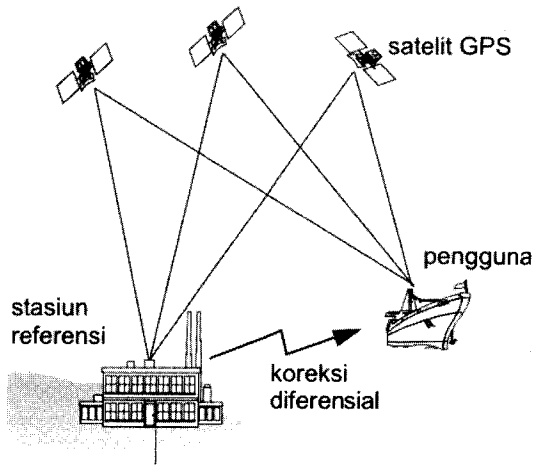


Gambar 2.27 **Penentuan posisi kinematik GPS, moda absolut dan diferensial**

Tergantung pada jenis data yang digunakan serta metode penentuan posisi yang digunakan, ketelitian posisi kinematik yang diberikan oleh GPS dapat berkisar dari tingkat: rendah (penentuan posisi absolut dengan *pseudorange*) sampai tingkat tinggi (penentuan posisi diferensial dengan fase). Dari segi aplikasinya, metode kinematik GPS ini akan bermanfaat untuk navigasi, pemantauan (*surveillance*), *guidance*, fotogrametri, *airborne gravimetry*, survei hidrografi dan lainnya.

Sistem DGPS

DGPS adalah akronim yang sudah umum digunakan untuk sistem penentuan posisi real-time secara diferensial menggunakan data *pseudorange*. Sistem ini umumnya digunakan untuk penentuan posisi objek-objek yang bergerak. Untuk merealisasikan tuntutan *real-time*-nya, maka monitor *station* harus mengirimkan koreksi diferensial ke pengguna secara *real-time* menggunakan sistem komunikasi data tertentu, seperti yang dilustrasikan pada Gambar 2.28. Koreksi diferensial ini dapat berupa koreksi *pseudorange* (seperti RTCM SC-104) maupun koreksi koordinat. Dalam hal ini, yang umum digunakan adalah koreksi *pseudorange*. Koreksi koordinat jarang digunakan, karena koreksi ini menuntut bahwa stasiun referensi pengirim koreksi serta pengamat mengamati set satelit yang sama, dimana hal ini umumnya tidak selalu dapat direalisir dalam operasional lapangannya. Ketelitian tipikal posisi yang diberikan oleh sistem DGPS ini adalah berkisar

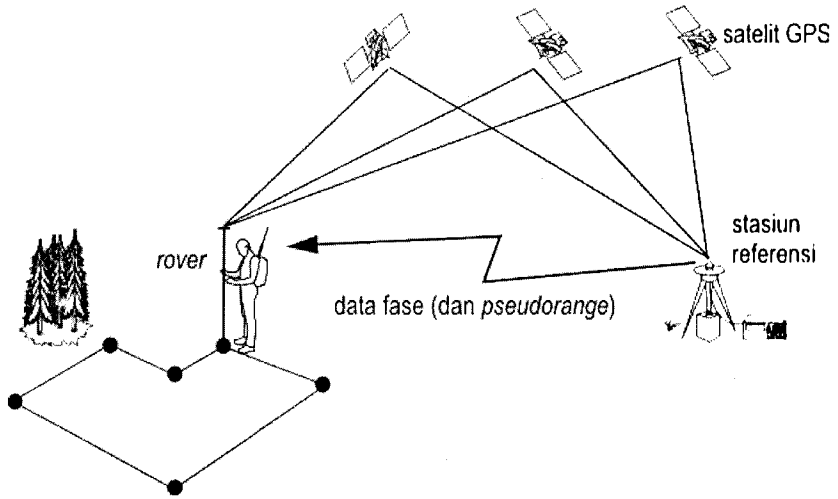


Gambar 2.28 **Sistem DGPS**

sekitar 1 sampai 3 m atau lebih baik. Dengan ketelitian setingkat itu, sistem DGPS ini umum digunakan pada survei survei kelautan. Tergantung pada luas wilayah cakupan koreksinya, sistem DGPS umumnya dibedakan atas *Local Area* DGPS (LADGPS) dan *Wide Area* DGPS (WADGPS).

Sistem RTK

Sistem RTK (*Real-Time Kinematic*) adalah suatu akronim yang sudah umum digunakan untuk sistem penentuan posisi *real-time* secara diferensial menggunakan data fase. Untuk merealisasikan tuntutan *real-time*-nya, stasiun referensi harus mengirimkan data fase dan *pseudorange*-nya ke pengguna secara *real-time* menggunakan sistem komunikasi data tertentu, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.29.



Gambar 2.29 **Sistem RTK**

Ketelitian posisi yang diberikan oleh sistem RTK ini adalah sekitar 1 hingga 5 cm. Sistem RTK dapat pula digunakan untuk penentuan posisi objek-objek yang diam maupun bergerak, sehingga sistem RTK ini tidak hanya dapat merealisakan survei GPS *real-time*, tapi juga navigasi berketilitian tinggi.

e. Keunggulan Metode Penentuan Posisi GPS

Pertama, GPS dapat digunakan setiap saat tanpa tergantung waktu dan cuaca, baik siang maupun malam hari, dalam kondisi cuaca yang buruk sekalipun seperti hujan ataupun kabut. Karena karakteristiknya ini maka penggunaan GPS dapat meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas dari pelaksanaan aktivitas-aktivitas yang terkait dengan penentuan posisi, yang pada akhirnya dapat diharapkan akan dapat memperpendek waktu pelaksanaan aktivitas tersebut serta menekan biaya operasionalnya.

Kedua, satelit-satelit GPS mempunyai ketinggian orbit yang cukup tinggi, yaitu sekitar 20,000 km di atas permukaan bumi, dan jumlahnya relatif cukup banyak, yaitu setidaknya 24 satelit. Ini menyebabkan GPS dapat meliput wilayah yang cukup luas, sehingga akan dapat digunakan oleh banyak orang pada saat yang sama, serta pemakaiannya menjadi tidak tergantung pada batas-batas politik dan batas alam. Selama yang bersangkutan mempunyai alat penerima sinyal (*receiver*) GPS, maka ia akan dapat menggunakan GPS untuk penentuan posisi.

Ketiga, penggunaan GPS dalam penentuan posisi relatif tidak terlalu terpengaruh dengan kondisi topografis dan pantai sekitar kawasan survei kelautan, serta jarak kawasan survei dari pantai, dibandingkan dengan penggunaan metode optik maupun metode elektronik. Penentuan posisi dengan GPS juga tidak memerlukan adanya saling keterlihatan antara titik di pantai dengan titik lainnya di laut. Yang diperlukan dalam penentuan posisi titik dengan GPS adalah saling keterlihatan antara titik tersebut dengan satelit. Karena kawasan laut adalah kawasan yang umumnya terbuka ruang pandangnya ke langit, maka penggunaan GPS pada umumnya efektif dan efisien.

Keempat, posisi yang ditentukan dengan GPS akan mengacu ke suatu datum global yang dinamakan WGS-84. Dengan kata lain, posisi yang diberikan oleh GPS akan selalu mengacu ke datum yang sama, tidak tergantung pada lokasi dari kawasan-kawasan survei laut yang ditangani. Karakteristik ini sangat menguntungkan untuk kondisi Indonesia yang wilayahnya sangat luas dan terdiri dari banyak pulau, tempat kawasan-kawasan laut secara topografis banyak 'terpisah' oleh pulau-pulau.

Kelima, GPS dapat memberikan ketelitian posisi yang spektrumnya cukup luas. Dari yang sangat teliti (orde milimiter) sampai yang biasa-biasa saja (orde puluhan meter). Luasnya spektrum ketelitian yang bisa diberikan ini memungkinkan penggunaan GPS secara efektif dan efisien sesuai dengan

ketelitian yang diminta serta dana yang tersedia, untuk semua tahapan survei kelautan.

Keenam, pemakaian sistem GPS tidak dikenakan biaya (gratis). Selama pengguna memiliki alat penerima (*receiver*) sinyal GPS maka yang bersangkutan dapat menggunakan sistem GPS untuk berbagai aplikasi tanpa dikenakan biaya oleh pihak yang memiliki satelit, dalam hal ini Departemen Pertahanan Keamanan, Amerika Serikat. Jadi, investasi yang perlu dilakukan oleh pengguna hanyalah untuk alat penerima sinyal GPS beserta perangkat keras dan lunak untuk pemprosesan datanya.

Ketujuh, alat penerima sinyal (*receiver*) GPS cenderung menjadi lebih kecil ukurannya, lebih murah harganya, lebih baik kualitas data yang diberikannya, dan lebih tinggi keandalannya. Ini terutama disebabkan oleh kemajuan di bidang elektronika dan komputer yang sangat pesat dewasa ini. Perangkat lunak komersil untuk pengolahan data GPS juga semakin banyak tersedia dengan harga yang relatif murah. Selain itu, karena banyaknya merk dan jenis *receiver* yang beredar, kompetisi antar sesama pembuat *receiver* juga semakin tinggi, yang salah satu dampaknya adalah terhadap tersedianya semakin banyak *receiver* GPS yang lebih *user-oriented*.

f. Kendala GPS dalam Penentuan Posisi

Meskipun keuntungan yang dapat diperoleh dari penggunaan GPS jauh lebih banyak, ada beberapa hal dan keterbatasan yang harus diperhatikan dalam pemakaian GPS dalam bidang survei kelautan, agar pemakaiannya dapat optimal dan tepat sasaran. Beberapa hal dan keterbatasan tersebut dijelaskan secara singkat berikut ini.

Pertama, agar alat penerima sinyal GPS dapat menerima sinyal GPS, maka tidak boleh ada penghalang antara alat penerima tersebut dengan satelit yang bersangkutan. Ini harus secara serius diperhitungkan, terutama dalam penempatan antena di kapal survei. Antena sebaiknya dipasang pada bagian kapal yang paling tinggi untuk meminimalkan obstruksi sinyal dari bagian-bagian badan kapal.

Kedua, datum penentuan posisi yang digunakan oleh GPS adalah WGS-84. Seandainya posisi harus dipresentasikan dalam datum lainnya, maka diperlukan proses transformasi koordinat dari datum WGS 1984 ke datum bersangkutan. Problem transformasi datum akan menjadi lebih besar seandainya hasil survei dan pemetaan dengan GPS akan direpresentasikan

dalam suatu datum lokal yang hubungan geometrisnya dengan datum WGS-84 tidak diketahui atau tidak jelas.

Ketiga, komponen tinggi koordinat tiga-dimensi yang diberikan GPS adalah tinggi yang mengacu ke permukaan ellipsoid, yaitu ellipsoid referensi WGS-84. Jadi, tinggi titik yang didapatkan dengan GPS bukanlah tinggi ortometris, yaitu tinggi yang mengacu ke permukaan geoid (umum didekati dengan muka laut rata-rata, MSL), yang umum digunakan sehari-hari untuk keperluan praktis. Perlu diingat bahwa tinggi GPS tidak boleh langsung diintegrasikan dengan tinggi yang diperoleh dari pengukuran terestris dengan metode sipat datar (*levelling*) ataupun dengan MSL yang diestimasi dari hasil pengamatan pasut.

Keempat, karena GPS merupakan teknologi yang relatif baru, maka sumberdaya manusia yang menguasai masalah teknologi ini di Indonesia relatif masih belum terlalu banyak. Oleh sebab itu, seandainya suatu instansi pemerintah ingin menggunakan teknologi GPS ini untuk mendukung pekerjaan-pekerjaan survei kelautan di lingkungan mereka, maka selain pengadaan perangkat keras dan perangkat lunak GPS, penyiapan sumber daya manusia yang terkait juga tidak boleh dilupakan. Tanpa didukung dengan sumber daya manusia GPS dengan kuantitas dan kualitas yang memadai, maka peralatan-peralatan yang canggih sekalipun akan menjadi kurang berarti.

Referensi

Abidin, H. Z. (2000). *Penentuan Posisi Dengan GPS dan Aplikasinya*. P.T. Pradnya Paramita, Jakarta. Edisi Kedua. ISBN 979-408-377-1. 268pp.

Abidin, H. Z., Jones, A., & Kahar, J. (2002). *Survei dengan GPS*. P.T. Pradnya Paramita, Jakarta. ISBN 979-408-380-1. Edisi Kedua. 280pp.

Davis, R. E., Foote, F. S., Anderson, J. M. & Mikhail, E. M. (1981). *Surveying. Theory and Practice*. McGraw-Hill. New York, USA.

Langley, R. B. (1998). *RTK GPS. GPS World*, Vol. 9, No. 9, September, pp. 70–76.

Wells, D. E., Beck, N., Delikaraoglou, D., Kleusberg, A., Krakiwsky, E. J., Lachapelle, G., Langley, R. B., Nakiboglu, M., Schwarz, K. P., Tranquilla, J. M. & Vanicek, P. (1986). *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates. Fredericton, N.B., Canada.

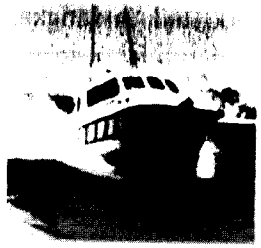
Pustaka

Langeraar, W. (1984). *Surveying and Charting the Sea*. Elsevier Oceanography Series. Amsterdam, The Netherlands.

Ingham, A.E. (1973). *Sea Surveying*. John Wiley & Sons. London, U. K.

Kelompok Bidang Keahlian Kelautan (1989). *Pendidikan Survei Hidrografi ITB-PERTAMINA*. Diktat Kuliah. Jurusan Teknik Geodesi, Institut Teknologi Bandung.

Ferrara, A. (1967). *Electronic Positioning Systems for Surveyors*. Coast and Geodetic Survey, Engineering Division. Rockville, M.D.



Bab 3
Pasut dan Datum Vertikal

A. PASUT

Pasut laut (*ocean tide*) adalah fenomena naik dan turunnya permukaan air laut secara periodik yang disebabkan oleh pengaruh gravitasi benda-benda langit terutama bulan dan matahari. Pengaruh gravitasi benda-benda langit terhadap bumi tidak hanya menyebabkan pasut laut, tetapi juga mengakibatkan perubahan bentuk bumi (*bodily tides*) dan atmosfer (*atmospheric tides*). Istilah 'pasut laut' pada buku ini akan dinyatakan dengan 'pasut' yang merupakan gerak naik dan turun muka laut dengan periode rata-rata sekitar 12.4 jam atau 24.8 jam. Fenomena lain yang berhubungan dengan pasut adalah arus pasut, yaitu gerak badan air menuju dan meninggalkan pantai saat air pasang dan surut.

Permukaan air laut dipakai sebagai tinggi nol. Kedalaman suatu titik di dasar perairan atau ketinggian titik di pantai mengacu pada permukaan laut yang dianggap sebagai bidang referensi (atau datum) vertikal. Karena posisi muka laut selalu berubah, maka penentuan tinggi nol harus dilakukan dengan merata-ratakan data tinggi muka air yang diamati pada rentang waktu tertentu. Data tinggi muka air pada rentang waktu tertentu juga berguna untuk keperluan peramalan pasut. Analisis data pengamatan tinggi muka air juga akan berguna untuk mengenali karakter pasut dan fenomena lain yang mempengaruhi tinggi muka air laut.

Gravitasi bulan merupakan pembangkit utama pasut. Walaupun massa matahari jauh lebih besar dibanding massa bulan, namun karena jarak bulan yang jauh lebih dekat ke bumi dibanding matahari, matahari hanya memberikan pengaruh yang lebih kecil terhadap pembangkitan pasut di bumi. Rasio massa bulan - bumi adalah sekitar 1:85, sedangkan rasio massa bulan - matahari adalah sekitar $1:3.18\times10^5$. Jarak rata-rata pusat massa bumi

dengan pusat massa matahari adalah sekitar 98,830,000 mil, sedangkan jarak rata-rata pusat massa bumi dengan pusat massa bulan adalah sekitar 238,862 mil, akibatnya perbandingan gravitasi bulan dan matahari (masing-masing terhadap bumi) adalah sekitar 1: 0.46.

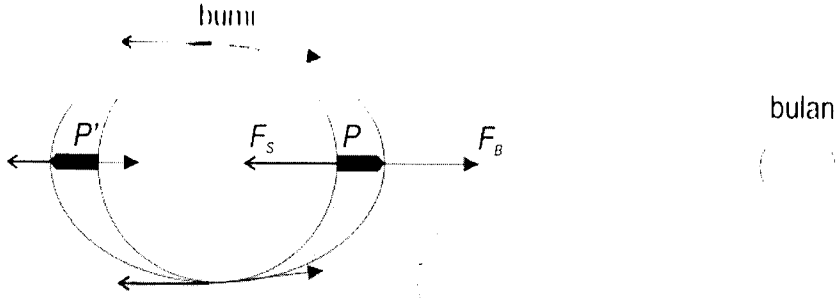
a. Teori Pasut

Fenomena pasut dijelaskan dengan 'teori pasut setimbang' yang dikemukakan oleh Bapak Fisika Klasik, Sir Isaac Newton pada abad ke-17. Teori ini menganggap bahwa bumi berbentuk bola sempurna dan dilingkupi air dengan distribusi massa yang seragam. Pembangkitan pasut dijelaskan dengan 'teori gravitasi universal', yang menyatakan bahwa: pada sistem dua benda dengan massa m_1 dan m_2 akan terjadi gaya tarik menarik sebesar F di antara keduanya yang besarnya sebanding dengan perkalian massanya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (3.1)$$

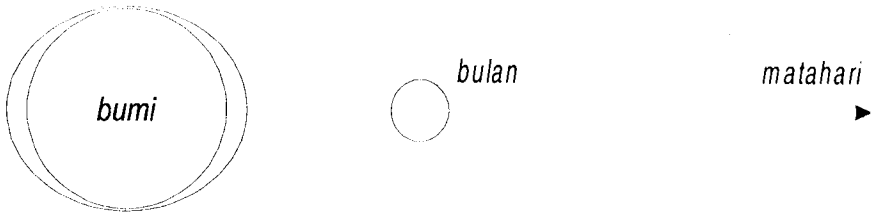
Pada sistem bumi-bulan, gaya-gaya pembangkit pasut (*tide generating forces*) adalah resultan gaya-gaya yang menyebabkan terjadinya pasut, yaitu: gaya sentrifugal sistem bumi-bulan (F_S) dan gaya gravitasi bulan (F_B). F_S bekerja dalam persekutuan pusat gravitasi bumi-bulan yang titik massanya terletak di sekitar ¾ jari-jari bumi dari titik pusat bumi. F_S bekerja dengan kekuatan yang seragam di seluruh titik di permukaan bumi dengan arah yang selalu menjauhi bulan pada garis yang sejajar dengan garis yang menghubungkan pusat bumi dan bulan. Besar F_B tergantung pada jarak pusat massa suatu titik partikel air di permukaan bumi terhadap pusat massa bulan. Resultan F_S dan F_B menghasilkan gaya pembangkit pasut di sekujur permukaan bumi (Gambar 3.1).

Pada titik P yang lokasinya terdekat dengan bulan dan segaris dengan sumbu bumi-bulan, gaya gravitasi bulan yang bekerja pada titik pengamat tersebut lebih besar dibanding dengan gaya sentrifugalnya ($F_B > F_S$). Di titik P badan air tertarik menjauhi bumi ke arah bulan. Seiring dengan menjauhnya lokasi titik pengamat terhadap bulan, gaya gravitasi yang bekerja pada titik-titik di permukaan bumi pun akan semakin kecil. Di titik P', gaya sentrifugal lebih dominan dibanding gaya gravitasi bulan ($F_B < F_S$), sehingga badan air tertarik menjauhi bumi pada arah menjauhi bulan.



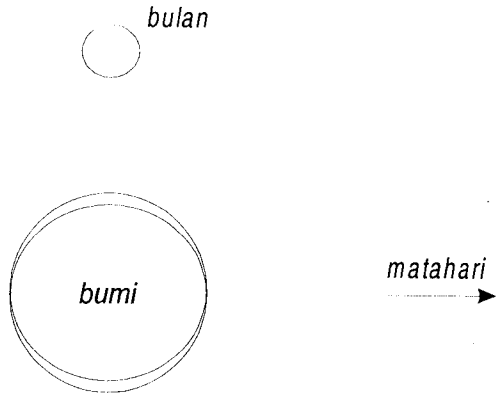
Gambar 3.1 **Arah gaya sentrifugal dan gaya gravitasi bulan yang bekerja di permukaan bumi**

Fenomena pembangkitan pasut menyebabkan perbedaan tinggi permukaan air laut pada kondisi kedudukan-kedudukan tertentu dari bumi, bulan dan matahari. Saat *spring*, yaitu saat kedudukan matahari segaris dengan sumbu bumi-bulan, maka terjadi pasang maksimum pada titik di permukaan bumi yang berada di sumbu kedudukan relatif bumi, bulan dan matahari (Gambar 3.2). Saat tersebut terjadi ketika bulan baru dan bulan purnama. Fenomena pasut pada kedudukan demikian disebut dengan *spring tide* atau pasut perbani.



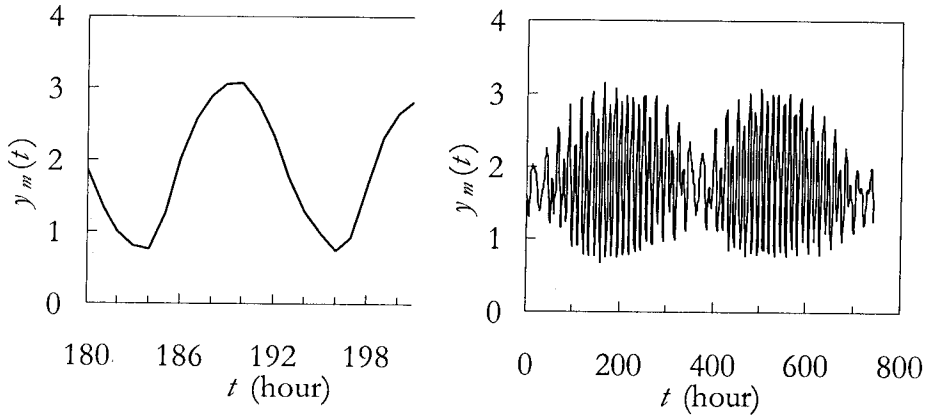
Gambar 3.2 **Kedudukan bumi, bulan dan matahari saat *spring* (bulan baru dan purnama)**

Saat *neap*, yaitu saat kedudukan matahari tegak lurus dengan sumbu bumi-bulan, terjadi pasut minimum pada titik di permukaan bumi yang tegak lurus sumbu bumi-bulan (Gambar 3.3). Saat tersebut terjadi di perempat bulan awal dan perempat bulan akhir. Fenomena pasut pada kedudukan demikian disebut dengan *neap tide* atau pasut mati. Tunggang pasut (jarak vertikal kedudukan permukaan air tertinggi dan terendah) saat *spring* lebih besar dibanding saat *neap*.



Gambar 3.3 **Kedudukan bumi, bulan dan matahari saat *neap* (perempat bulan awal dan perempat bulan akhir)**

Gambar 3.4 memperlihatkan data pengamatan tinggi muka air $y_m(t)$ terhadap waktu t (jam) selama 1 piantan atau 25 jam saat pasut perbani dengan tunggang pasut sekitar 2 meter dan 1 bulan atau 744 jam. Tipe pasut yang diperlihatkan tergolong harian ganda dengan jarak waktu dua posisi muka air tertinggi sekitar 6 jam. Pasut perbani dan pasut mati berjarak waktu sekitar 7 hari, sedangkan jarak waktu dua pasut perbani adalah sekitar 14 hari.



Gambar 3.4 **Data pengamatan tinggi muka air 1 piantan (25 jam) dan 1 bulan (744 jam) di Delta Mahakam, Kalimantan (sumber data: Total E & P Indonesie)**

b. Model Matematika Pasut dan Konstanta Harmonik

Pasut dimodelkan dengan persamaan:

$$y_B = A_B \cos(\omega t + \phi) \qquad (3.2)$$

dengan y_B = tinggi muka air saat t, A_B = amplitudo pasut, ω = kecepatan sudut = $2\pi f$, t = waktu dan ϕ = keterlambatan fase. Pasut yang terjadi di suatu titik di permukaan bumi merupakan resultan dari jarak dan kedudukan bulan dan matahari terhadap bumi yang selalu berubah secara periodik. Fenomena ini dinyatakan dengan superposisi dari persamaan-persamaan gelombang pasut karena bulan, matahari dan kedudukan-kedudukan relatifnya.

Perbandingan amplitudo dan fase akibat atraksi benda-benda langit tertentu pada pola pasut dinyatakan dengan konstanta-konstanta pembanding dengan simbol dan nilai tertentu untuk menjelaskan akibat atraksi gravitasi bulan atau matahari dengan kedudukan tertentu terhadap tinggi muka air. Konstanta-konstanta tersebut disebut sebagai komponen harmonik. Tabel 3.1 memperlihatkan komponen-komponen harmonik utama berikut periodanya.

c. Tipe Pasut

Pasut di satu lokasi pengamatan dipisahkan menurut tipe *diurnal*, *semi-diurnal* dan *mixed*. Pasut *diurnal* (harian tunggal) terjadi dari satu kali kedudukan permukaan air tertinggi dan satu kali kedudukan permukaan air terendah dalam satu hari pengamatan. Pasut di pantai utara Jawa termasuk jenis ini. Pasut *semi-diurnal* (harian ganda) terjadi dari dua kali kedudukan permukaan air tinggi dan dua kali kedudukan permukaan air rendah dalam satu hari pengamatan. Pasut *mixed* (campuran) terjadi dari gabungan *diurnal* dan *semi-diurnal*. Defant (1958) mengelompokkan pasut menurut perbandingan jumlah amplitudo komponen *diurnal* terhadap jumlah amplitudo komponen *semi-diurnal*, yang dinyatakan dengan:

$$N_f = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \qquad (3.3)$$

Berdasarkan N_f, pasut dikelompokkan menurut tipe tipe yang ditampilkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Komponen-komponen harmonik pasut utama

SPESIES	NAMA KOMPONEN	PERIODA (jam)	FENOMENA
Semi-diurnal	M_2	12.42	Gravitasi bulan dengan orbit lingkaran dan sejajar ekuator bumi
	S_2	12.00	Gravitasi matahari dengan orbit lingkaran dan sejajar ekuator bumi
	N_2	12.66	Perubahan jarak bulan ke bumi akibat lintasan yang berbentuk elips
	K_2	11.97	Perubahan jarak matahari ke bumi akibat lintasan yang berbentuk elips
Diurnal	K_1	23.93	Deklinasi sistem bulan dan matahari
	O_1	25.82	Deklinasi bulan
	P_1	24.07	Deklinasi matahari
Perioda panjang	M_f	327.86	Variasi setengah bulanan
	M_m	661.30	Variasi bulanan
	S_{sa}	2191.43	Variasi semi tahunan
Perairan dangkal	$2SM_2$	11.61	Interaksi bulan dan matahari
	MNS_2	13.13	Interaksi bulan dan matahari dengan perubahan jarak matahari akibat lintasan berbentuk elips
	MK_3	8.18	Interaksi bulan dan matahari dengan perubahan jarak bulan akibat lintasan berbentuk elips
	M_4	6.21	2× kecepatan sudut M_2
	MS_4	2.20	interaksi M_2 dan S_2

Tabel 3.2 Pengelompokkan tipe pasut

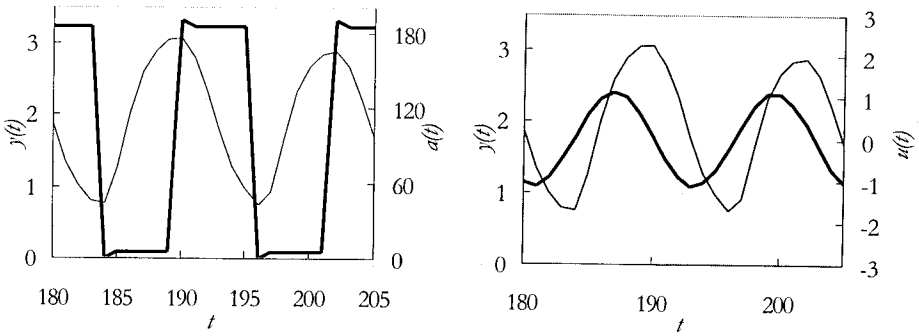
NILAI BENTUK	JENIS PASUT	FENOMENA
$0 < N_f < 0.25$	Harian ganda murni	2× pasang sehari dengan tinggi yang relatif sama
$0.25 < N_f < 1.5$	Campuran berganda	2× pasang sehari dengan perbedaan tinggi dan interval yang berbeda
$1.5 < N_f < 3$	Campuran tunggal	1× atau 2× pasang sehari dengan interval yang berbeda
$N_f > 3$	Tunggal murni	1× pasang sehari, saat *spring* dapat terjadi 2× pasang sehari

B. ARUS PASUT

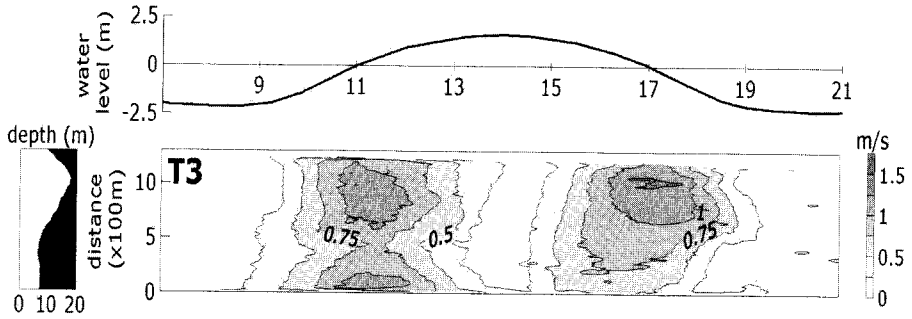
Gerak vertikal (naik dan turunnya) permukaan air laut karena pasut pada wilayah perairan dan interaksinya dengan batas-batas perairan tempat pasut tersebut terjadi menimbulkan gerak badan air ke arah horisontal. Batas-batas perairan tersebut dapat berupa dinding (pantai dan kedangkalan) dan lantai (dasar) perairan. Fenomena ini sangat terasa pada wilayah perairan tertutup (teluk), perairan dangkal, kanal-kanal pasut dan muara sungai (delta dan estuari). Istilah *tidal stream* atau *tidal current* atau arus pasut kemudian diberikan pada fenomena ini yang merupakan gerak horisontal badan air menuju dan menjauhi pantai seiring dengan naik dan turunnya muka laut yang disebabkan oleh gaya-gaya pembangkit pasut.

Arus pasut mempunyai sifat bergerak dengan arah yang saling bertolak belakang atau *bi-directional*. Arah arus saat air meninggi biasanya bertolak belakang dengan arah arus saat air merendah. Kecepatan arus pasut minimum atau efektif nol terjadi saat air tinggi atau air rendah (*slack waters*). Pada saat-saat tersebut terjadi perubahan arah arus pasut. Kecepatan arus pasut maksimum terjadi pada saat-saat antara air tinggi dan air rendah. Dengan demikian, perioda kecepatan arus pasut akan mengikuti perioda pasut yang membangkitkannya. Gambar 3.5 memperlihatkan hubungan pengamatan pasut $y(t)$ (garis tipis) dengan arah $a(t)$ dalam derajat terhadap

Utara dan kekuatan arus pasut $u(t)$ dalam m/s (garis-garis tebal) hipotetik pada pantai yang memanjang pada arah Timur-Barat dengan bagian laut terletak di sebelah Selatan. Gambar 3.6 menunjukkan hubungan antara arus pasut dan tinggi muka air pada pengamatan arus di sepanjang penampang sebuah kanal pasut selama 21 jam.



Gambar 3.5 **Hubungan antara pasut dengan arah (kiri) dan kekuatan arus pasut**



Gambar 3.6 **Hubungan antara pengamatan tinggi muka air dan kekuatan arus pasut (dimodifikasi dari Poerbandono, 2003)**

Kekuatan maksimum arus pasut dapat diperkirakan dari amplitudo pasut dan kedalaman perairan pada daerah yang diamati dan dinyatakan dengan (Knauss, 1979):

$$u_{max} = A\sqrt{\frac{g}{d}} \qquad (3.4)$$

dengan u_{max} - kecepatan maksimum arus pasut, A amplitudo pasut, g akselerasi karena gravitasi bumi dan d kedalaman perairan. Sebaran vektor pengamatan arus pada suatu kawasan pesisir merupakan informasi penting untuk mengetahui pola pergerakan arus dari waktu ke waktu. Kecepatan arus dapat dipakai untuk memperkirakan besarnya energi yang bekerja di dasar perairan yang mampu memindahkan sedimen dari suatu tempat ke tempat lain. Akibat perpindahan sedimen ini akan terjadi erosi atau deposisi (sedimentasi).

C. DATUM VERTIKAL

Tinggi titik di pantai atau kedalaman titik di laut hanya dapat ditentukan secara relatif terhadap bidang yang disepakati sebagai referensi tinggi atau datum vertikal. Datum vertikal ditentukan dengan merata-ratakan data pasut sepanjang rentang waktu pengamatan. Permukaan laut rata-rata atau *Mean Sea Level* (MSL) diperoleh dari satu atau beberapa stasiun pengamat pasut dan dipakai sebagai datum vertikal (de Jong, et al., 2002). Berikut ini diperkenalkan beberapa istilah tinggi rata-rata pasut yang dapat dipakai untuk membandingkan karakteristik pasut dan penentuan datum vertikal dari data pengamatan pasut (Tabel 3.3).

Tabel 3.3 Beberapa istilah* dan definisi datum vertikal (CARIS, 2003)

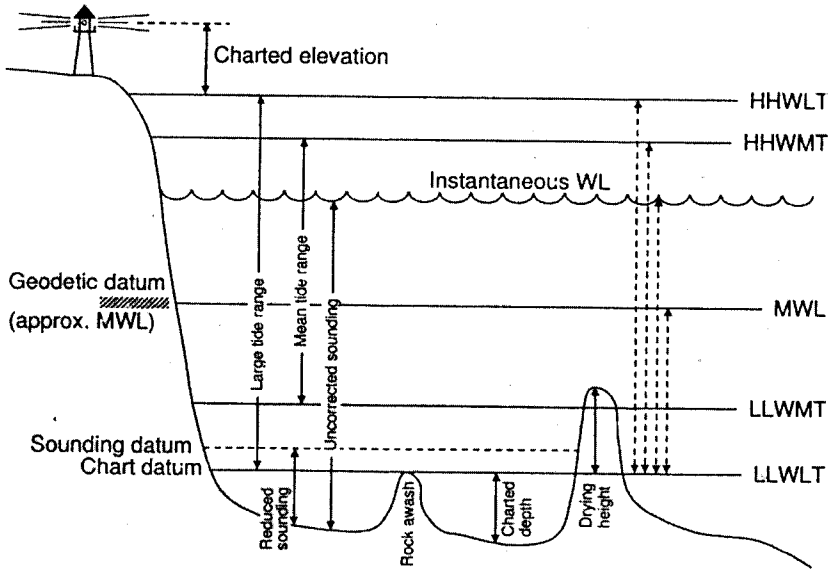
NO.	ISTILAH	DEFINISI
1.	*Approximate Lowest Astronomical Tide*	*An arbitrary level, usually within ±0.3m from that of lowest astronomical tide* (LAT). (Hydrographic Service, Royal Australian Navy)
2.	*Approximate Mean Low Water*	*An arbitrary level, usually within ±0.3m from that of mean low water* (MLW). (Hydrographic Service, Royal Australian Navy)
3.	*Approximate Mean Low Water Springs*	*An arbitrary level, usually within ±0.3m from that of mean low water springs* (MLWS). (Hydrographic Service, Royal Australian Navy)
4.	*Approximate Mean Lower Low Water*	*An arbitrary level, usually within ±0.3m from that of mean lower low water* (MLLW). (Hydrographic Service, Royal Australian Navy)
5.	*Approximate Mean Sea Level*	*An arbitrary level, usually within ±0.3m from that of mean sea level* (MSL). (Hydrographic Service, Royal Australian Navy)
6.	*Equinoctial Spring Low Water*	*The level of low water springs near the time of an equinox*

7.	*High Water*	*The highest level reached at a place by the water surface in one tidal cycle. Also called high tide.* (IHO Dictionary, S-32, 5th Edition, 2251); *when used on inland (non-tidal) waters it is generally defined as a level which the daily mean water level exceeds less than 5% of the time.*
8.	*High Water Springs* (MHWS)	*An arbitrary level, approximating that of mean high water springs.* (Hydrographic Service, Royal Australian Navy)
9.	*Higher High Water Large Tide* (HHWLT)	*The average of the highest high waters, one from each of 19 years of observations.*
10.	*Highest Astronomical Tide* (HAT)	*The highest tidal level which can be predicted to occur under average meteorological conditions and under any combination of astronomical conditions* (IHO Dictionary, S-32, 5th Edition, 2244)
11.	*Indian Spring Low Water* (ISLW)	*An arbitrary tidal datum approximating the level of the mean of the lower low water at spring tides. Also called Indian tidal plane.* (IHO Dictionary, S-32, 5th Edition, 2427) *A tidal datum approximating the lowest water level observed at a place, originated by G.H. Darwin for the tides of India at a level below MSL being equal to the sum of amplitudes of the harmonic constituents M2, S2, K1 and O1; usually below that of the lower low water at spring tides. Also called Indian tide plane.* (Hydrographic Service, Royal Australian Navy).
12.	*International Great Lakes Datum 1985* (IGLD 1985)	*A vertical reference system with its zero based on the mean water level at Rimouski/Pointe-au-Père, Quebec, over the period 1970 to 1988.*
13.	*Local Datum*	*An arbitrary datum defined by a local harbour authority, from which levels and tidal heights are measured by this authority.*
14.	*Low Water*	*An approximation of mean low water adopted as the reference level for a limited area, irrespective of better determinations at a later date. Used mostly in harbour and river engineering. used in inland (non-tidal) waters. It is generally defined as a level which the daily mean water level would fall below less than 5% of the time and by no more than 0.2 metres during the navigation season. A single level surface is usually chosen as the low water datum for a whole lake. On a river, low water datum is a sloping surface which approximates the river surface at a low state.* (Canadian Hydrographic Service)
15.	*Low Water Springs*	*An arbitrary level, approximating that of mean low water springs* (MLWS). (Hydrographic Service, Royal Australian Navy)

16.	*Lower Low Water Large Tide* (LLWLT)	*The average of the lowest low waters, one from each of 19 years of observations.*
17.	*Lowest Astronomical Tide* (LAT)	*The lowest tide level which can be predicted to occur under average meterological conditions and under any combination of astronomical conditions.* (IHO Dictionary, S-32, 5th Edition, 2936)
18.	*Lowest Low Water*	*An arbitrary level conforming to the lowest tide observed at a place, or some what lower.*
19.	*Lowest Low Water Springs*	*An arbitrary level conforming to the lowest water level observed at a place at spring tides during a period of time shorter than 19 years.* (Hydrographic Service, Royal Australian Navy)
20.	*Mean High Water* (MHW)	*The average height of all high waters at a place over a 19-year period.* (IHO Dictionary, S-32, 5th Edition, 3141)
21.	*Mean High Water Springs* (MHWS)	*The average height of the high waters of spring tides; Also called spring high water.* (IHO Dictionary, S-32, 5th Edition, 3144)
22.	*Mean Higher High Water* (MHHW)	*The average height of higher high waters at a place over a 19-year period.* (IHO Dictionary, S-32, 5th Edition, 3140)
23.	*Mean Low Water* (MLW)	*The average height of all low waters at a place over a 19-year period.* (IHO Dictionary, S-32, 5th Edition, 3147)
24.	*Mean Low Water Springs* (MLWS)	*The average height of the low waters of spring tides. Also called spring low water.* (IHO Dictionary, S-32, 5th Edition, 3150)
25.	*Mean Lower Low Water* (MLLW)	*The average height of the lower low waters at a place over a 19-year period.* (IHO Dictionary, S-32, 5th Edition, 3145)
26.	*Mean Lower Low Water Springs* (MLLWS)	*The average height of lower low water springs at a place.* (IHO Dictionary, S-32, 5th Edition, 3146)
27.	*Mean Sea Level* (MSL)	*The average height of the surface of the sea at a tide station for all stages of the tide over a 19-year period, usually determined from hourly height readings measured from a fixed predetermined reference level.* (IHO Dictionary, S-32, 5th Edition, 3156)
28.	*Mean Water Level*	*The average of all hourly water levels over the available period of record.*
29.	*Nearly Highest High Water*	*An arbitrary level approximating the highest water level observed at a place, usually equivalent to the high water springs.*
30.	*Nearly Lowest Low Water*	*An arbitrary level approximating the lowest water level observed at a place, usually equivalent to the Indian spring low water* (ISLW). (Hydrographic Service, Royal Australian Navy)

*disesuaikan menurut abjad

Untuk keperluan navigasi digunakan muka air terendah sebagai datum vertikal untuk angka-angka kedalaman laut yang dinyatakan sebagai angka-angka dan garis-garis kontur kedalaman pada peta navigasi laut. Muka air terendah dipilih sedemikian rupa sehingga hampir tidak pernah terjadi keadaan ketika angka kedalaman yang tercantum di peta lebih kecil dari kedalaman aktual. Datum vertikal ini disebut sebagai *chart datum* atau muka surutan. Penentuan muka surutan ditujukan untuk menjamin keselamatan pelayaran. Muka surutan yang ditetapkan dari pengamatan pasut umumnya lebih rendah dari tinggi rata-rata permukaan air laut terendah saat bulan perbani. Pada Gambar 3.7 diperlihatkan kedudukan relatif beberapa datum vertikal.



Gambar 3.7 **Visualisasi kedudukan beberapa datum vertikal (de Jong et al., 2002)**

Melalui analisis harmonik terhadap data pengamatan pasut akan diperoleh amplitudo komponen-komponen pasut. Berdasarkan amplitudo komponen harmonik tersebut ditetapkan muka surutan yang berada pada jarak sebesar Z_0 terhadap MSL. Z_0 diperoleh dengan penjumlahan amplitudo komponen-komponen pasut tertentu. Banyaknya komponen pasut yang digunakan tergantung dari banyaknya komponen harmonik pasut yang diperoleh dari analisis harmonik. Selisih jarak MSL ke muka surutan berdasarkan standar internasional diperoleh dengan:

$$Z_0 = \sum_{i=1}^{n} A_i \qquad (3.5)$$

dengan A_i = amplitudo komponen pasut ke-i, n = jumlah komponen. Standar penggunaan amplitudo komponen harmonik di beberapa negara dalam penentuan muka surutan berbeda-beda. Bahkan pada satu negara sekali pun, misalnya di Inggris, digunakan beberapa muka surutan sekaligus (Adams, 2004). Tabel 3.4 memperlihatkan beberapa standar penentuan Z_0 yang digunakan oleh beberapa negara di dunia. Saat ini cenderung direkomendasikan penggunaan LAT sebagai muka surutan.

Tabel 3.4 Beberapa persamaan untuk menentukan Z_0

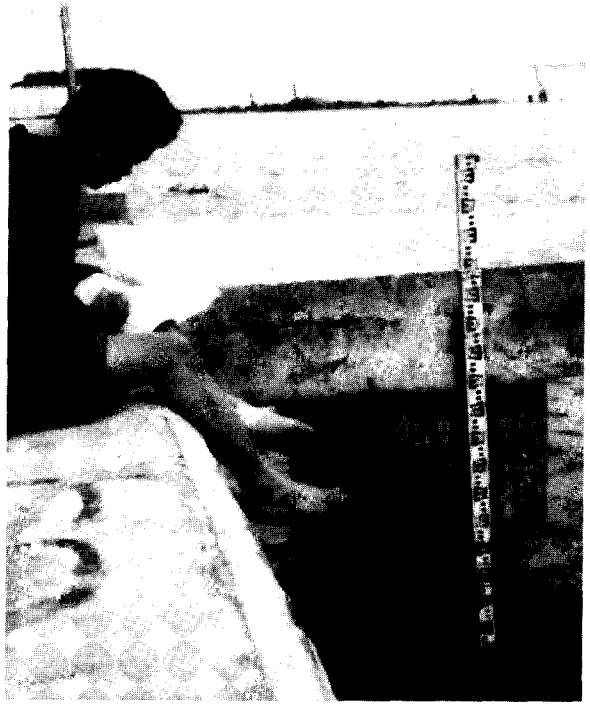
NEGARA	Z_0
Amerika	$Z_0 = M_2$
Inggris	$Z_0 = 1.1(M_2+S_2)$
Prancis	$Z_0 = 1.2(M_2+S_2+K_2)$

Pada peta navigasi laut juga disajikan informasi garis pantai yang berimpit dengan kedudukan muka air pada saat tertinggi. Penggunaan muka air tinggi sebagai referensi elevasi dimaksudkan untuk menjamin keselamatan investasi di wilayah pesisir dan dataran rendah di sekitarnya. Datum vertikal yang dipakai untuk referensi bagi elevasi atau tinggi nol bagi titik-titik di daratan biasanya ditentukan dari muka laut rata-rata.

a. Pengamatan Pasut

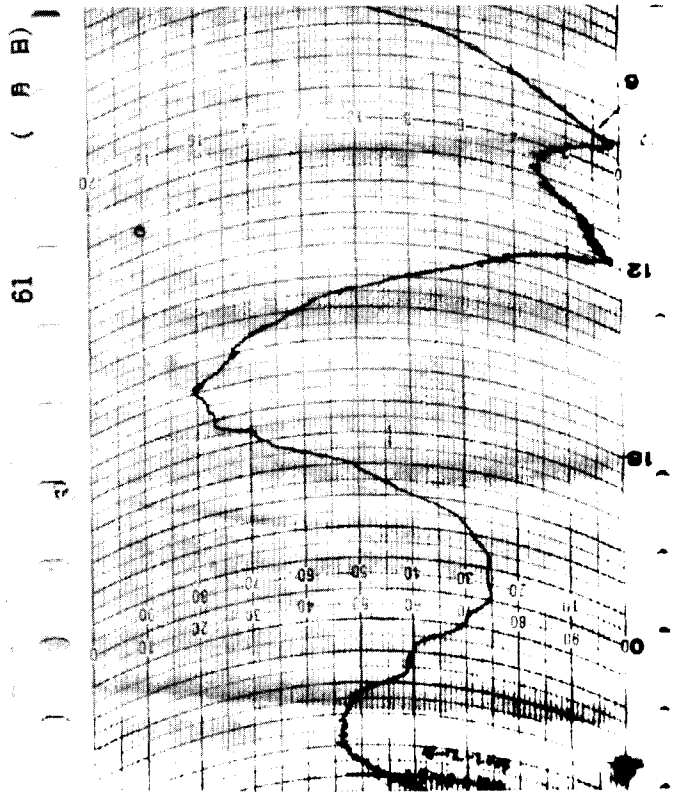
Pengamatan pasut dilakukan untuk memperoleh data tinggi muka air laut di suatu lokasi. Berdasarkan hasil pengamatan tersebut dapat ditetapkan datum vertikal tertentu yang sesuai untuk keperluan-keperluan tertentu pula. Pengamatan pasut dilakukan dengan mencatat atau merekam data tinggi muka air laut pada setiap interval waktu tertentu. Rentang pengamatan pasut sebaiknya dilakukan selama selang waktu keseluruhan periodisasi benda-benda langit yang mempengaruhi terjadinya pasut telah kembali pada posisinya 'semula'. Rentang waktu pengamatan pasut yang lazim dilakukan untuk keperluan praktis adalah 15 atau 29 piantan (1 piantan = 25 jam). Interval waktu pencatatan atau perekaman tinggi muka laut biasanya adalah 15, 30 atau 60 menit.

Cara yang paling sederhana untuk mengamati pasut dilakukan dengan palem atau rambu pengamat pasut (Gambar 3.8). Tinggi muka air setiap jam diamati secara manual oleh operator (pencatat) dan dicatat pada suatu formulir pengamatan pasut. Pada palem dilukis tanda-tanda skala bacaan dalam satuan desimeter. Pencatat akan menuliskan kedudukan tinggi muka air laut relatif terhadap palem pada jam-jam tertentu sesuai dengan skala bacaan yang tertulis pada palem. Muka air laut yang relatif tidak tenang membatasi kemampuan pencatatan dalam menaksir bacaan skala. Walaupun demikian, cara ini cukup efektif untuk memperoleh data pasut dengan ketelitian hingga sekitar 2.5 cm. Tinggi palem disesuaikan dengan karakter tunggang air pada wilayah perairan yang diamati pola pasutnya, yang biasanya sekitar 4 hingga 6 meter.



Gambar 3.8 **Pengamatan pasut dengan palem (Foto: Bramasto A. Wijaya)**

Teknologi pengamatan pasut yang lebih maju tidak lagi menggunakan cara manual dan memerlukan orang yang ditugasi untuk mengamati dan mencatat tinggi muka air. Sebuah alat pengamat pasut mekanik yang digunakan untuk ini adalah *tide gauge*. Gerakan naik dan turunnya air laut dideteksi dengan sebuah pelampung yang digantungkan pada kawat baja. Kawat baja tersebut digulungkan pada suatu silinder penggulung. Sebuah sistem mekanik melakukan peredaman dan konversi gerakan silinder penggulung kawat baja dari ke arah vertikal menjadi ke arah horisontal. Gerakan horisontal bolak-balik tersebut kemudian disambungkan pada sebuah pena yang menggoreskan tinta pada gulungan kertas perekam data yang digulungkan pada suatu silinder. Gambar 3.9 memperlihatkan rekaman tinggi muka air pada kertas perekam berskala dari pengukuran menggunakan *tide gauge* mekanik.



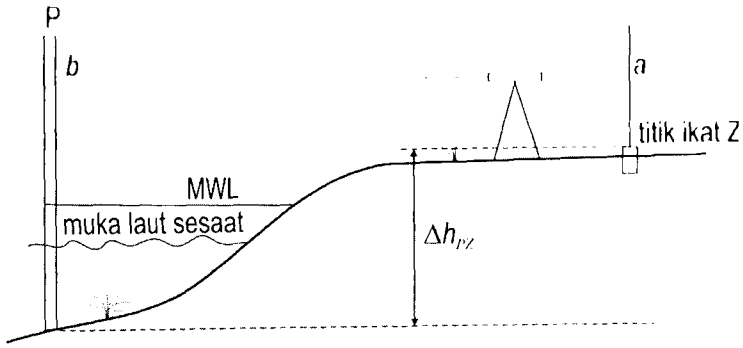
Gambar 3.9 **Rekaman data pengamatan pasut dengan *tide gauge* mekanik**

Kertas perekam digerakkan dengan sistem mekanik bertenaga listrik sehingga memungkinkan memberikan kecepatan sudut yang konstan dan setara dengan jam pengamatan. Pada kertas perekam juga terdapat skala bacaan yang memungkinkan untuk melakukan kalibrasi dan pembacaan rekaman data yang efisien. *Tide gauge* semacam ini disebut dengan *tide gauge* mekanik, karena sensor tinggi muka air dan pencatatannya pun dilakukan secara mekanik. Pelampung biasanya diletakkan pada pipa dalam sistem bejana berhubungan untuk mereduksi gerak muka laut sesaat karena gelombang dan angin. Pengembangan dari sistem ini adalah penggunaan sensor akustik atau optik (sebagai pengganti sensor mekanik) untuk mengukur tinggi muka air dengan perekaman secara digital.

Untuk skala regional dan global, satelit altimetri Topex/Poseidon yang bekerja menggunakan pulsa RADAR kini dapat dimanfaatkan untuk mengukur tinggi muka air laut yang berada jauh dari pantai. Satelit altimetri adalah satelit pengamat global dan dipakai untuk memantau tinggi permukaan laut di seluruh bagian bumi. Sistem ini mempunyai *footprint beam* pada radius sekitar 7 km dan sangat rentan terhadap *noise* yang ditimbulkan oleh daratan, sehingga tidak memungkinkan untuk pemantauan lokal. Sistem pengamatan pasut lokal dan dekat pantai yang paling maju saat ini adalah dengan suatu sebaran stasiun pengamat pasut permanen dengan sensor laser dan perekaman secara digital. Data pengamatan ditransmisikan melalui jaringan telepon atau gelombang radio ke suatu stasiun pusat pengolahan data.

b. Pengikatan Stasiun Pengamat Pasut

Pengikatan stasiun pengamat pasut adalah prosedur standar yang dilakukan untuk mengetahui kedudukan nol palem relatif terhadap suatu titik di pantai yang ditetapkan untuk keperluan rekonstruksi. Titik pengikatan nol palem tersebut perlu didokumentasikan (atau dibuat permanen sebagai *bench mark*) dengan baik agar mudah ditentukan kembali. Pengikatan stasiun pengamat pasut dilakukan dengan pengukuran sipat datar untuk menentukan beda tinggi nol palem relatif terhadap titik pengikat. Jika selisih tinggi palem terhadap titik ikat diketahui, maka selisih tinggi tersebut nantinya akan digunakan untuk mendefinisikan tinggi titik ikat itu sendiri setelah datum vertikal ditentukan dari pengamatan pasut. Gambar 3.10 memperlihatkan kedudukan palem (atau alat pengamat pasut lain) di *P* sebesar Δh_{pz} terhadap titik pengikat *Z*. Tinggi muka air yang diamati, diukur relatif terhadap nol palem berdasarkan beda tinggi yang diukur dengan sipat datar.



Gambar 3.10 **Skema pengikatan stasiun pengamat pasut**

Beberapa persyaratan untuk penempatan lokasi stasiun pasut yang harus dipenuhi antara lain adalah:

- Lokasi stasiun pasut harus menggambarkan karakteristik pasang surut di daerah sekitarnya.
- Tanah di daerah lokasi stasiun pasut harus keras (tidak berlumpur)
- Lokasi stasiun pasut sebaiknya jauh dari muara sungai, untuk menghindari pengaruh aliran serta endapan dan sampah yang terbawa menuju ke laut.
- Perairan di lokasi stasiun pasut diupayakan bersih dan jernih serta tidak terganggu oleh tetumbuhan laut yang ada di sekitarnya.
- Lokasi dicari sedemikian rupa agar memudahkan pengawasan dan pemeliharaan stasun pasut.
- Terlindung dari pengaruh ombak dan gelombang serta pengaruh lainnya secara langsung.

D. PREDIKSI PASUT

Prediksi pasut ditujukan untuk memperoleh informasi tinggi muka laut di masa mendatang pada saat dan lokasi tertentu. Hasil prediksi ditampilkan dalam tabel yang berisi jam dan tinggi muka air. Tabel-tabel prediksi pasut di beberapa lokasi dipublikasikan dalam sebuah buku pasut. Cara lain untuk menyajikan informasi prediksi tinggi muka air adalah dengan *co tidal chart*. *Co tidal chart* dibangun dengan interpolasi (tunggang atau keterlambatan fase pasut) dari beberapa stasiun pengamat pasut. Dari interpolasi terhadap tunggang atau keterlambatan fase pasut tersebut akan didapatkan

masing-masing *co-range* dan *co-phase chart*. Penyajian dengan cara ini memberi informasi tinggi muka air pada lokasi-lokasi yang tidak tersedia stasiun pengamat pasut.

Prediksi pasut dilakukan dengan menurunkan atau mencari komponen-komponen pasut dari data pasut dengan rentang pengamatan tertentu. Pendekatan yang dipakai untuk mendapatkan komponen-komponen pasut adalah analisis harmonik. Cara yang lazim dipakai adalah metode *Admiralty* (Hydrografisch Bureau, 1949) atau kuadrat terkecil (misalnya: Grant, 1988). Penggunaan metode *Admiralty* biasanya diterapkan pada panjang data 15 atau 29 piantan dengan interval waktu pengamatan 1 jam. Untuk data dengan interval waktu pengamatan yang lebih kecil dengan rentang waktu pengaman yang lebih panjang, metode kuadrat terkecil cukup efektif dipakai untuk mendapatkan komponen-komponen harmonik dari data pengamatan pasut.

a. Analisis Harmonik

Gerakan vertikal muka air laut yang periodik merupakan resultan atraksi gravitasi bulan dan matahari pada waktu dan kedudukan tertentu. Maka gelombang pasut yang diamati di suatu lokasi merupakan superposisi dari beberapa gelombang yang masing-masing pada setiap saat tertentu dibangkitkan oleh kedudukan benda langit tertentu. Deviasi muka laut terhadap kedudukan rata-ratanya dinyatakan dengan:

$$y(t) = y_0 + \sum_{i-1}^{n} A_i \cos(\omega_i t - \phi_i) \qquad (3.6)$$

dengan, $y(t)$ = tinggi muka laut sesaat, y_0 = tinggi muka laut rata-rata, A_i = amplitudo komponen pasut i dan n jumlah komponen pasut yang dilibatkan. Dari data pengamatan pasut akan diperoleh data untuk Persamaan 3.6 di ruas kiri yaitu $y(t)$ dan dengan mengasumsikan keterlambatan fase untuk komponen pasut i, maka Persamaan 3.6 dapat dipecahkan untuk menemukan A_i.

Metode *Admiralty* dikembangkan oleh A. T. Doodson, Direktur *Tidal Institute* di Liverpool dan digunakan untuk keperluan kantor hidrografi Inggris, yaitu British Admiralty. Doodson mengembangkan sistematika pengolahan data pengamatan pasut dengan bantuan skema dan tabel-tabel pengali. Ketentuan dan langkah-langkah yang penggunaan metode *Admiralty* untuk

prediksi pasut dapat di *download* dari **http://laut.gd.itb.ac.id/home/pelatihan.htm.** Dengan metode ini, ada sembilan komponen pasut yang dapat diturunkan. Metode kuadrat terkecil didasarkan pada penentuan tinggi muka air model yang memberikan kuadrat kesalahan terhadap tinggi muka air pengamatan yang minimum. Dari *website* yang sama, dapat diperoleh program yang dapat digunakan untuk melakukan analisis pasut dengan metode kuadrat terkecil.

b. Prediksi LAT

LAT merupakan kedudukan muka air laut terendah hasil prediksi selama periode waktu 18,6 tahun. Model prediksi kedudukan muka air laut didekati dengan:

$$y(t) = y_{MSL} + \sum_{i-1}^{n} v_i A_i \cos(\omega_i t + F^o{}_i + f^o{}_i + \phi_i) \qquad (3.7)$$

dengan $y(t)$ = kedudukan muka air laut saat t, y_{MSL} = kedudukan muka air laut rata-rata atau MSL *(Mean Sea Level)* terhadap alat pengamat pasut, v_i = faktor nodal komponen pasut i, A_i = amplitudo komponen pasut i, ω_i = kecepatan sudut komponen pasut i, $F^o{}_i + f^o{}_i$ = fase komponen pasut kesetimbangan i, dan ϕ_i = fase komponen pasut i. Kedudukan MSL serta amplitudo dan fase masing-masing komponen pasut yang dilibatkan dalam model diperoleh dari hasil analisis harmonik. Kecepatan sudut masing-masing komponen pasut diketahui berdasarkan hasil analisis astronomis. Sedangkan faktor nodal dan fase komponen pasut kesetimbangan dihitung berdasarkan argumen waktu. Data kedudukan muka air laut yang dibutuhkan untuk melakukan analisis harmonik bervariasi, namun minimal dibutuhkan data pasut selama setahun.

c. Pengaruh Faktor-faktor Non-Harmonik

Pada kondisi tertentu, faktor-faktor non-harmonik mempunyai pengaruh yang penting terhadap tinggi muka laut pada skala lokal, regional atau global yang mengakibatkan perubahan (positif atau negatif) tinggi muka laut selama saat-saat tertentu atau terus menerus. Perubahan tinggi muka laut tersebut dapat disebabkan oleh faktor meteorologis (tingginya hujan, angin besar, naik atau turunnya suhu global dan sebagainya) atau hidrologis (aliran

sungai, banjir dan sebagainya). Komponen non-harmonik dapat ditemukan dari panjang data pengamatan pasut yang cukup dan korelasi dengan data pengamatan lainnya, seperti: curah hujan dan debit air. Lokasi-lokasi yang terpengaruh oleh komponen non-harmonik adalah daerah-daerah pantai yang dekat dengan muara sungai atau dataran-dataran rendah pantai yang berada pada daerah aliran sungai.

Referensi

Adams, R. (2004). *Seamless Data and Vertical Datums - Reconciling Chart Datum with a Global Reference Frame*. The Hydrographic Journal 113.

CARIS (2003). *Vertical Datum*. http://www.caris.com/S-57/attribut/def/d-verdat.htm.

de Jong, C. D., Lachapelle G., Skone, S. & Elema, I. A. (2002). *Hydrography*. Delft University Press. Delft, The Netherlands.

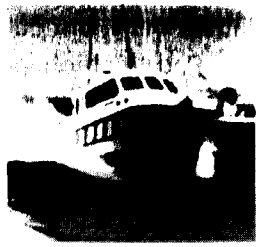
Defant, A. (1985). *Ebb and Flow*. University of Michigan Press, Ann Arbor, USA.

Grant, S. T. (1988). *Simplified Tidal Analysis and Prediction*. Lighthouse, 37, Canadian Hydrographic Service, Nova Scotia, Canada.

Hidrografisch Bureau (1949). *Overzicht der Getijleer*. Afdeling Hydrografie, Ministerie van Marine, Staat der Nederlanden.

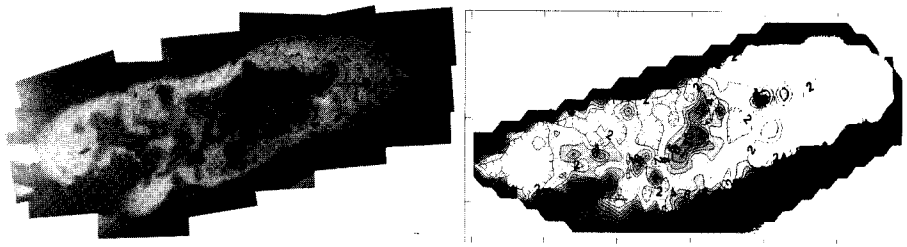
Knauss, J. A. (1979). *Introduction to Physical Oceanography*. Prentice-Hall. New Jersey, USA.

Poerbandono (2003). *Sediment Transport Measurements and Modelling in the Meldorf Bight Tidal Channels, German North Sea Coast*. Dissertation. University of Kiel, Germany.



Bab 4
Pemeruman

Pemeruman adalah proses dan aktivitas yang ditujukan untuk memperoleh gambaran (model) bentuk permukaan (topografi) dasar perairan (*seabed surface*). Proses penggambaran dasar perairan tersebut (sejak pengukuran, pengolahan hingga visualisasinya) disebut sebagai survei batimetri. Gambaran dasar perairan dapat disajikan dalam garis-garis kontur atau model permukaan digital. Gambar 4.1 dan 4.2 memperlihatkan visualisasi dasar perairan sebuah pulau terumbu karang di gugusan Kepulauan Seribu.



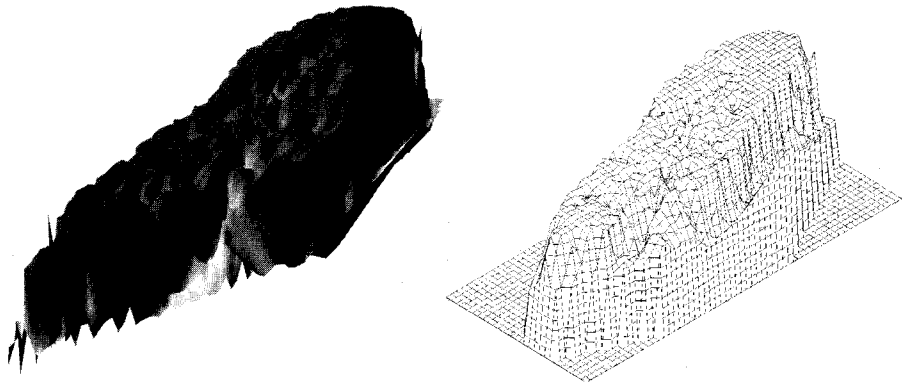
(a) Mozaik citra foto udara (sumber:Pemerintah Kabupaten Administratif Kepulauan Seribu)

(b) Garis-garis kontur, angka-angka menyatakan kedalaman dalam meter

Gambar 4.1 **Visualisasi dasar perairan dengan garis-garis kontur kedalaman (a) dari pemeruman di sebuah pulau terumbu karang (b)**

Garis-garis kontur kedalaman atau model batimetri diperoleh dengan menginterpolasikan titik-titik pengukuran kedalaman yang tersebar pada lokasi yang dikaji. Kerapatan titik-titik pengukuran kedalaman bergantung pada skala model yang hendak dibuat. Persyaratkan kerapatan minimum titik-titik pengukuran kedalaman dapat dilihat di Lampiran D. Titik-titik pengukuran

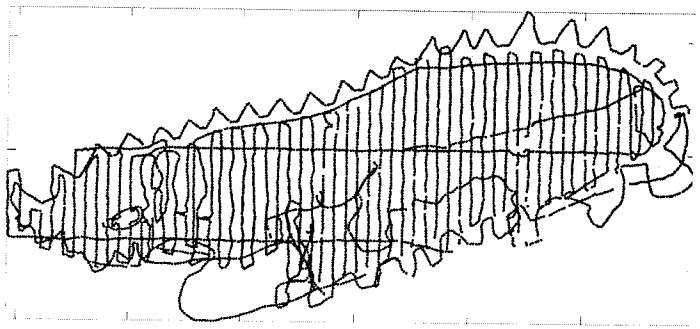
kedalaman berada pada lajur-lajur pengukuran kedalaman yang disebut sebagai lajur perum atau *sounding line* (Gambar 4.3). Pada contoh di Gambar 4.1 dan 4.2 jarak antar lajur perum adalah 100 m yang melingkupi daerah survei seluas sekitar 3x6 km².



(a) Model batimetri dalam penyajian tiga dimensi

(b) Model batimetri dalam penyajian dengan *wireframe*

Gambar 4.2 **Model permukaan dasar perairan (batimetri)**



Gambar 4.3 **Lajur-lajur perum**

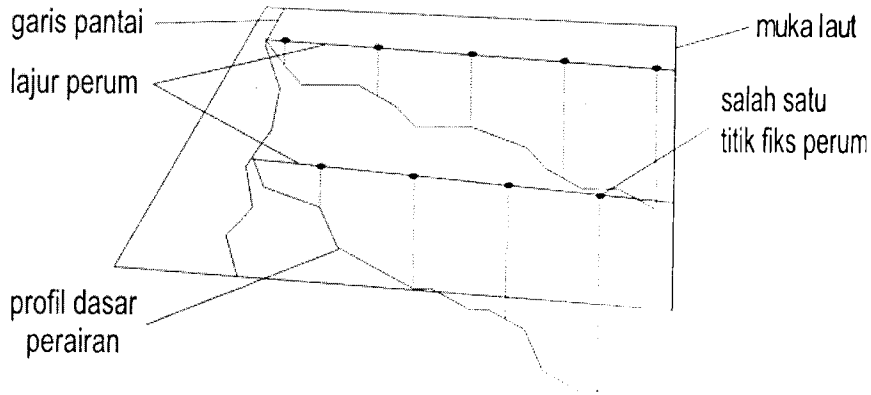
Jarak antar titik-titik fiks perum pada suatu lajur pemeruman setidak-tidaknya sama dengan atau lebih rapat dari interval lajur perum. Saat ini, teknik perekaman data kedalaman sudah dapat dilakukan secara digital. Laju perekaman data telah mencapai kecepatan yang lebih baik dari 1 titik per detik

A. PENGUKURAN KEDALAMAN

Pengukuran kedalaman dilakukan pada titik titik yang dipilih untuk mewakili keseluruhan daerah yang akan dipetakan. Pada titik titik tersebut juga dilakukan pengukuran untuk penentuan posisi. Titik-titik tempat dilakukannya pengukuran untuk penentuan posisi dan kedalaman disebut sebagai titik fiks perum. Pada setiap titik fiks perum harus juga dilakukan pencatatan waktu (saat) pengukuran untuk reduksi hasil pengukuran karena pasut.

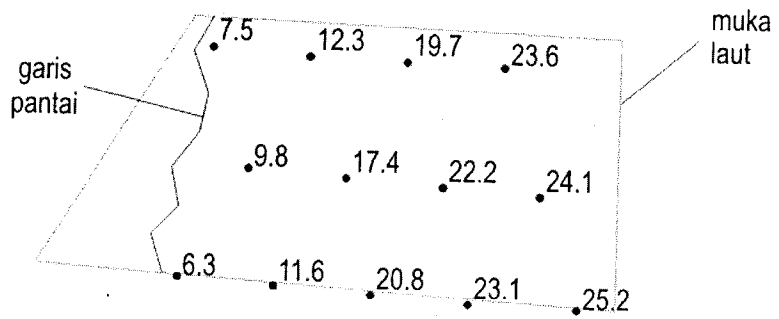
a. Desain Lajur Perum

Pemeruman dilakukan dengan membuat profil (potongan) pengukuran kedalaman. Lajur perum dapat berbentuk garis-garis lurus, lingkaran-lingkaran konsentrik, atau lainnya sesuai metode yang digunakan untuk penentuan posisi titik-titik fiks perumnya. Lajur-lajur perum didesain sedemikian rupa sehingga memungkinkan pendeteksian perubahan kedalaman yang lebih ekstrem. Untuk itu, desain lajur-lajur perum harus memperhatikan kecenderungan bentuk dan topografi pantai sekitar perairan yang akan disurvei. Agar mampu mendeteksi perubahan kedalaman yang lebih ekstrem lajur perum dipilih dengan arah yang tegak lurus terhadap kecenderungan arah garis pantai (Gambar 4.4).



Gambar 4.4 **Lajur-lajur perum garis lurus dengan arah tegak lurus garis pantai**

Dari pengukuran kedalaman di titik-titik fiks perum pada lajur lajur perum yang telah didesain, akan didapatkan sebaran titik-titik fiks perum pada daerah survei yang nilai-nilai pengukuran kedalamannya dapat dipakai untuk menggambarkan batimetri yang diinginkan (Gambar 4.5). Berdasarkan sebaran angka-angka kedalaman pada titik-titik fiks perum itu, batimetri perairan yang disurvei dapat diperoleh dengan menarik garis-garis kontur kedalaman. Penarikan garis kontur kedalaman dilakukan dengan membangun grid dari sebaran data kedalaman. Dari grid yang dibangun, dapat ditarik garis-garis yang menunjukkan angka-angka kedalaman yang sama.



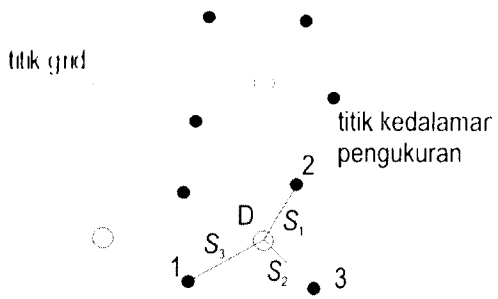
Gambar 4.5 **Angka-angka kedalaman pada titik-titik fiks perum**

b. Prinsip Penarikan Garis Kontur

Teknik yang paling sederhana untuk menarik garis kontur adalah dengan teknik triangulasi menggunakan interpolasi linier. Grid dengan interval yang seragam dibangun di atas sebaran titik-titik tersebut. Nilai kedalaman di setiap titik-titik grid dihitung berdasarkan tiga titik kedalaman terdekat dengan pembobotan menurut jarak. Dari angka-angka kedalaman di setiap titik-titik grid, dapat dihubungkan dari titik-titik yang mempunyai nilai kedalaman yang sama. Gambar 4.6 memperlihatkan teknik penentuan tinggi pada suatu titik grid (D) dari tiga titik kedalaman pengukuran terdekat (1, 2 dan 3).

c. Teknik Pengukuran Kedalaman

Pengukuran kedalaman merupakan bagian terpenting dari pemeruman yang menurut prinsip dan karakter teknologi yang digunakan dapat dilakukan dengan metode mekanik, optik atau akustik.



Gambar 4.6 **Penentuan nilai titik grid dari tiga titik terdekat**

Metode Mekanik

Metode mekanik merupakan metode yang paling awal yang pernah dilakukan manusia untuk melakukan pengukuran kedalaman. Metode ini sering disebut juga dengan metode pengukuran kedalaman secara langsung. Pada beberapa kondisi lapangan tertentu, misalnya daerah perairan yang sangat dangkal atau rawa, cara ini masih cukup efektif untuk digunakan. Instrumen yang dipakai untuk melakukan pengukuran kedalaman dengan metode ini adalah tongkat ukur atau rantai ukur yang dilakukan dengan bantuan wahana apung. Bentuk dan penampilan tongkat ukur kurang lebih tidak jauh berbeda dengan rambu ukur yang dipakai untuk pengukuran sipat datar. Sedangkan rantai ukur, karena fleksibilitas bentuknya, biasanya dipakai untuk melakukan pengukuran kedalaman perairan yang rata rata lebih dalam dibanding tongkat ukur.

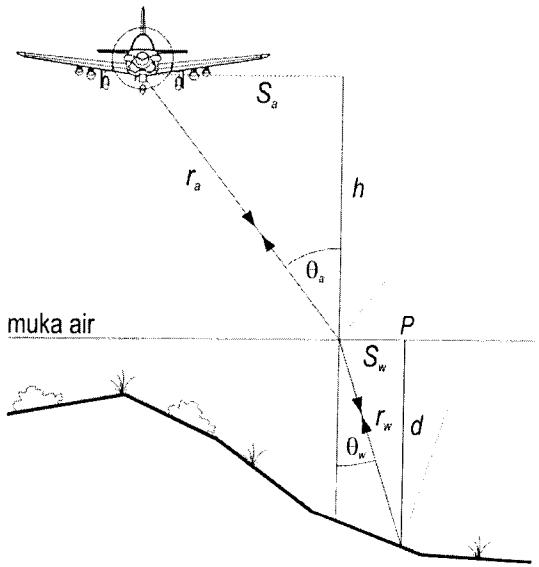
Pada tongkat ukur terdapat garis-garis dan angka-angka tanda skala bacaan ukuran. Pada rantai ukur terdapat tanda-tanda skala bacaan dengan warna-warna tertentu. Bacaan skala kadang-kadang ditempatkan juga pada silinder penggulung rantai. Pada ujung rantai (nol skala bacaan) digantungkan pemberat untuk menghindari sapuan arus perairan dan menjaga agar rantai senantiasa relatif tegak. Pengukuran kedalaman dilakukan dengan menenggelamkan alat hingga menyentuh dasar perairan. Kedudukan alat diusahakan tegak lurus terhadap permukaan air. Saat pengukuran kedalaman dilakukan, pada sumbu vertikal alat pengukur kedalaman ditempatkan sejenis target yang dipakai untuk penentuan posisi. Penggunaan rantai ukur menuntut ketersediaan wahana apung, namun tidak demikian halnya dengan tongkat ukur. Pada beberapa kondisi lapangan, surveyor harus turun ke dalam air untuk mengukur kedalaman dengan tongkat ukur. Pengukuran kedalaman

dengan metode mekanik efektif digunakan untuk pemetaan pada batas daerah survei yang relatif tidak luas dengan skala yang cukup besar.

Metode Optik

Pengukuran kedalaman dengan metode optik merupakan cara terbaru yang digunakan untuk pemeruman. Metode ini memanfaatkan transmisi sinar laser dari pesawat terbang dan prinsip-prinsip optik untuk mengukur kedalaman perairan. Teknologi ini dikenal dengan sebutan *laser airborne bathymetry* (LAB) dan telah dikembangkan menjadi suatu sistem pemeruman oleh beberapa negara di Amerika dan Australia. Di Kanada dikenal sistem *Light Detecting and Ranging* (LIDAR), di Amerika Serikat dikenal sistem *Airborne Oceanographic LIDAR* (AOL) dan *Hydrographic Airborne Laser Sounder* (HALS) sedangkan di Australia dikenal sistem *Laser Airborne Depth Sounder* (LADS). Teknologi LADS milik *Royal Australian Navy* pernah dicobakan untuk digunakan di Indonesia pada pertengahan tahun 90-an dengan mengambil daerah survei di perairan sekitar Pulau Enggano, Bengkulu, bekerja sama dengan BPP Teknologi dan Dishidros TNI-AL.

Pada metode ini sudut transmisi sinar laser diarahkan tegak lurus terhadap arah lintasan pesawat. Gambar 4.7 menunjukkan profil prinsip kerja LADS dalam melakukan pengukuran kedalaman di titik *P*.



Gambar 4.7 **Pengukuran kedalaman dengan sinar laser**

Kerja sistem LADS untuk pengukuran kedalaman dimulai dengan transmisi sinar laser dari pesawat terbang dengan sudut tertentu terhadap sumbu vertikal ke permukaan air. Pada titik di permukaan air yang dikenai transmisi, sebagian gelombang sinar laser dipantulkan dan dibiaskan ke segala arah dan salah satu berkasnya akan menembus ke dalam air. Berkas sinar laser yang menembus ke dalam air adalah sekitar 98% dari energi awalnya dan akan dibiaskan dengan arah mendekati garis normal (garis vertikal) akibat perubahan dari densitas medium yang lebih renggang ke densitas medium yang lebih rapat.

Berkas gelombang sinar laser akan meneruskan perjalanan perambatannya di dalam air hingga menyentuh dasar perairan dan dipantulkan ke segala arah dan salah satu berkasnya dipantulkan kembali ke arah sudut datangnya. Berkas sinar yang memantul ke arah sudut datangnya kemudian meneruskan perjalanan perambatannya dan menembus batas air dan udara. Karena perubahan densitas medium yang lebih rapat ke medium yang lebih renggang, berkas sinar akan dibiaskan menjauhi garis normal dan merambat pada garis lintasan yang searah dengan saat pertama kali ditransmisikan dan diterima kembali di pesawat terbang oleh unit penerima gelombang.

Untuk mendapatkan kedalaman pengukuran, parameter yang harus diketahui adalah sudut transmisi gelombang terhadap garis vertikal (θ_a), tinggi terbang pesawat (h) dan indeks bias udara-air di daerah survei (n_{aw}) (lihat: Gambar 4.7). Panjang lintasan sinar dari pesawat ke permukaan air (r_a) diperoleh dengan:

$$r_a = \sqrt{S_a{}^2 + h^2} \qquad (4.1)$$

dengan $S_a = h\tan\theta_s$. Dari indeks bias (n_{aw}) diperoleh hubungan:

$$n_{aw} = \frac{v_a}{v_w} = \frac{\sin\theta_a}{\sin\theta_w} \qquad (4.2)$$

dengan v_a = kecepatan cahaya pada medium udara dan v_w = kecepatan cahaya pada medium air laut. Dari hubungan tersebut diperoleh:

$$\theta_w = \sin^{-1}\left(\frac{v_a}{v_w}\sin\theta_a\right) \qquad (4.3)$$

Pencatat waktu di pesawat terbang mengukur selang waktu total (Δt) sejak gelombang ditransmisikan hingga diterima kembali di pesawat. Panjang lintasan yang ditempuh sinar laser adalah r, dengan $r = r_a + r_w$. Jika $r = v\Delta t$ maka:

$$r = r_a + r_w = (v_a \Delta t_a + v_w \Delta t_w) \quad (4.4)$$

sehingga:

$$\Delta t = 2(\Delta t_a + \Delta t_w) \quad (4.5)$$

Jika v_a telah diketahui, maka Δt_w dapat dihitung dengan Persamaan 4.5, sehingga r_w dapat pula dihitung. Jika v_w telah diketahui, maka kedalaman perairan di titik P diperoleh dengan:

$$d = r_w \cos\theta_w \quad (4.6)$$

Arah transmisi gelombang sinar laser selalu dibuat tegak lurus terhadap arah lintasan pesawat terbang. Jarak horisontal pesawat ke titik P (titik yang diukur kedalamannya) adalah sebesar $S = S_a + S_w$. Jarak horisontal dari titik P ke titik pembiasan sinar laser (S_w) diperoleh dengan:

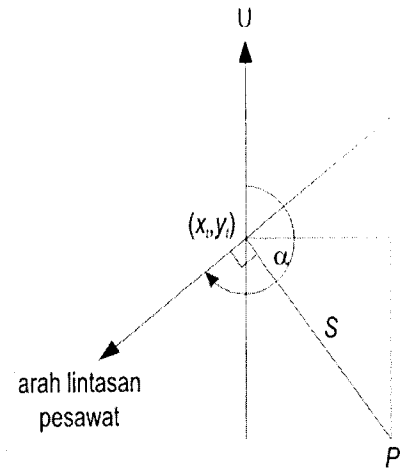
$$S_w = d\tan\theta_w \quad (4.7)$$

Posisi titik P ditentukan relatif terhadap posisi pesawat saat pengukuran dilakukan (Gambar 4.8), karenanya, posisi pesawat (x_t, y_t) dan arah lintasan terbangnya (α) harus selalu diketahui. Posisi titik P dapat dihitung dengan:

$$x_P = x_t + S\sin(\alpha - 180°) \quad (4.8)$$

$$y_P = y_t + S\cos(\alpha - 180°) \quad (4.9)$$

Teknologi LADS dioperasikan menggunakan pesawat terbang sekelas Fokker-27 Seri 500 dengan kecepatan terbang sekitar 145 knot pada ketinggian sekitar 500 meter di atas permukaan laut menggunakan sistem penentuan posisi *kinematic differential GPS*. Gelombang yang digunakan adalah sinar laser infra merah dengan panjang gelombang 532 nm dan periode 5 ns



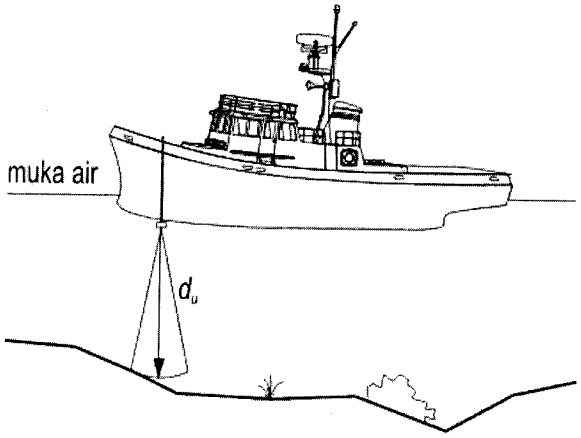
Gambar 4.8 **Penentuan posisi relatif titik *P* terhadap koordinat pesawat**

dengan pembangkitan daya sebesar 1 MW. Sistem ini dapat dipakai untuk melakukan pemeruman pada rentang kedalaman 2 hingga 50 meter dengan kondisi air yang jernih dan terbuka, cakupan daerah survei yang luas dan untuk pemetaan pada skala kecil. Daerah-daerah yang sulit dijangkau oleh wahana apung dengan teknologi mekanik atau akustik dapat dilipat oleh sistem ini. Air laut hampir tidak dapat ditembus oleh hampir semua gelombang elektromagnetik. Gelombang elektromagnetik pada frekuensi HF, VLF hingga cahaya akan kehilangan intensitasnya pada kedalaman kurang dari 100 m. Teknik pengukuran kedalaman dengan metode optik efektif digunakan pada perairan dangkal yang jernih dengan kedalaman sekitar 50 m.

Metode Akustik

Penggunaan gelombang akustik untuk pengukuran-pengukuran bawah air (termasuk: pengukuran kedalaman, arus dan sedimen) merupakan teknik yang paling populer dalam hidrografi hingga saat ini. Gelombang akustik dengan frekuensi 5 kHz atau 100 Hz akan mempertahankan kehilangan intensitasnya hingga kurang dari 10% pada kedalaman 10 km, sedangkan gelombang akustik dengan frekuensi 500 kHz akan kehilangan intensitasnya pada kedalaman kurang dari 100 m. Secara khusus, teknik ini dipelajari dalam hidro akustik. Untuk pengukuran kedalaman, digunakan *echosounder* atau perum gema yang pertama kali dikembangkan di Jerman tahun 1920 (Burton, 2002). Alat ini dapat dipakai untuk menghasilkan profil kedalaman yang kontinyu sepanjang lajur perum dengan ketelitian yang cukup baik

Alat perum gema menggunakan prinsip pengukuran jarak dengan memanfaatkan gelombang akustik yang dipancarkan dari tranduser (Gambar 4.9). Transduser adalah bagian dari alat perum gema yang mengubah energi listrik menjadi mekanik (untuk membangkitkan gelombang suara) dan sebaliknya. Gelombang akustik tersebut merambat pada medium air -dengan cepat rambat yang relatif diketahui atau dapat diprediksi- hingga menyentuh dasar perairan dan dipantulkan kembali ke transduser



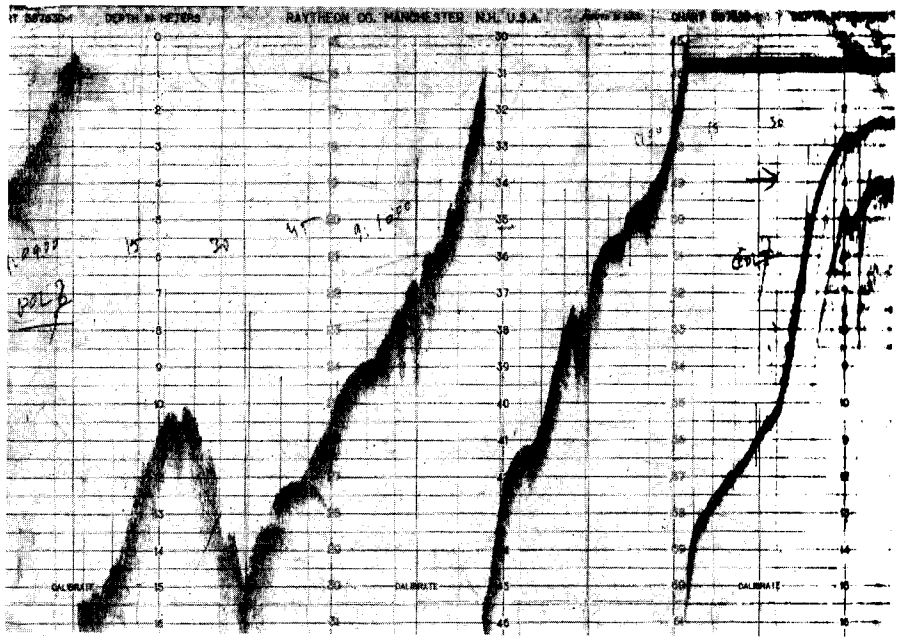
***Gambar 4.9* Pengukuran kedalaman secara akustik**

Perum gema menghitung selang waktu sejak gelombang dipancarkan dan diterima kembali (Δt), sehingga jarak dasar perairan relatif terhadap transduser adalah:

$$d_u = \frac{1}{2} v \Delta t \qquad (4.10)$$

dengan d_u = kedalaman hasil ukuran dan v = kecepatan gelombang akustik pada medium air. Hasil pengukuran kedalaman akan direkam sekaligus ditampilkan pada suatu gulungan kertas (*roll paper*) yang disebut sebagai *echogram* (kertas perum) atau direkam dan ditampilkan secara digital. Pada kertas perum akan terlukis profil kedalaman perairan sepanjang jalur survei kapal (lajur perum). Jika pada titik-titik tertentu ditandai saat (waktu) pengukurannya dan pengukuran untuk penentuan posisi dilakukan secara kontinyu dengan saat yang tercatat, maka hasil pencatatan waktu tersebut dapat digunakan untuk merekonstruksi posisi kapal saat melakukan

pengukuran kedalaman dilakukan. Gambar 4.10 memperlihatkan rekaman pengukuran kedalaman pada kertas perum (*echogram*). Garis-garis vertikal menunjukkan saat-saat penentuan posisi dilakukan dan disebut sebagai garis-garis fiks (*fix mark*). Pada garis-garis fiks tersebut, waktu perekaman data juga harus dicatat untuk sinkronisasi dengan koreksi pasut. Profil kedalaman yang dicontohkan pada Gambar 4.10 sangat curam, sehingga setiap potongan profil harus dibaca menurut skala pengukuran yang berbeda.



Gambar 4.10 **Rekaman pengukuran kedalaman pada kertas perum**

B. AKUSTIK BAWAH AIR UNTUK PEMERUMAN

oleh: Ir. Irdam Adil, M.T.

Cepat rambat gelombang akustik pada suatu medium bergantung pada massa jenis medium yang dilaluinya dan dinyatakan dengan hubungan (Lurton, 2002):

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \qquad (4.11)$$

dengan v = cepat rambat gelombang akustik, K = modulus elastisitas fluida dan r = densitas fluida. Modulus fluida menyatakan kompresibilitas, yaitu rasio perubahan tekanan terhadap perubahan volume. Pada medium yang lebih padat, misalnya: air dan udara, untuk mengubah volume suatu zat diperlukan perubahan tekanan yang lebih besar. Karenanya, gelombang akustik merambat lebih cepat di air (sekitar 1450 hingga 1500 m/s) daripada di udara (sekitar 300 m/s), sebab air lebih tidak *compressible* dibanding udara.

a. Sifat Gelombang Akustik

Kompresibilitas medium merupakan fungsi dari densitasnya, sehingga cepat rambat gelombang akustik pun merupakan fungsi densitas. Densitas air (laut) dipengaruhi oleh terutama suhu, salinitas dan tekanan hidrostatik (kedalaman perairan). Pada suhu air laut 20°C, densitasnya adalah sekitar 1023.4 kg/m^3 dan modulus elastisitasnya 2.28x10^9 N/m^2, sehingga cepat rambat gelombang akustik adalah 1492.6 m/s atau hampir 1500 m/s. Akurasi pengukuran jarak akustik akan dipengaruhi oleh estimasi cepat rambat gelombang akustik. Untuk mengestimasi cepat rambat gelombang aksutik, beberapa formula empirik dapat digunakan, yang salah satunya adalah (Medwin, 1975):

$$v = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016d \qquad (4.12)$$

dengan T = temperatur dalam °C, S = salinitas dalam psu dan d = kedalaman dalam m. Formula di atas berlaku untuk kedalaman hingga 1000 m.

Gelombang akustik merambat pada suatu medium dengan memindahkan energinya melalui partikel-partikel medium rambatnya. Intensitas gelombang akustik adalah besarnya energi yang mengalir pada selang waktu tertentu melalui satu satuan luas medium rambatnya:

$$I = \frac{P}{A} \qquad (4.13)$$

dengan I = intensitas akustik, P = daya dan A = luas bidang medium rambat. Intensitas akustik dinyatakan dalam Watt/m^2 dan merupakan kuadrat dari tekanan (p dalam N/m^2). Intensitas akustik mempunyai rentang yang sangat lebar, sehingga untuk menyatakannya, digunakan skala logaritmik dengan satuan desibel (dB):

$$IL = 10\log\left(\frac{I}{I_r}\right) = 10\log\left(\frac{p^2}{p_r^2}\right) = 20\log\left(\frac{p}{p_r}\right) \qquad (4.14)$$

dengan IL = tingkat intensitas akustik dan I_r = intensitas akustik referensi; yang pada medium udara dipakai ambang terbawah kemampuan pendengaran manusia yaitu 1x10^{-12} Watt dengan frekuensi rata-rata 1 kHz. Dalam akustik bawah air, tekanan akustik referensi (p_{rr}) yang digunakan adalah 1 µPa (mikro Paskal; 1 µPa = 1 N^2/m).

Intensitas akustik akan berkurang sejak dibangkitkan. Kehilangan intensitas akustik tersebut sebanding dengan jarak terhadap sumber gelombang yang disebut sebagai *geometrical spreading* (sebaran geometrik). Saat dibangkitkan, gelombang akan menyebar ke semua arah. Semakin jauh jarak perambatan gelombang dari titik pembangkitnya akan semakin luas bidang medium rambat yang dilaluinya sehingga semakin luas pula bidang medium rambat gelombang. Karena energi pembangkitnya konstan, maka intensitas akustik pun akan semakin kecil.

Selain sebaran geometrik, gelombang akustik akan mengalami pelemahan (*attenuation*) yang disebabkan oleh penyerapan energi untuk relaksasi molekul-molekul pada medium rambat yang diakibatkan oleh variasi tekanan karena perambatan gelombang akustik (Lurton, 2002). Laju pelemahan dipengaruhi oleh sifat medium rambat dan frekuensi gelombang akustik yang melaluinya. Laju pelemahan intensitas akustik disimbolkan sebagai α dan dinyatakan dalam dB/m. Frekuensi gelombang akustik merupakan faktor yang paling berpengaruh pada dan sebanding dengan laju pelemahan akustik. Oleh karena itu, instrumen akustik berfrekuensi tinggi hanya dapat dipakai pada perairan dangkal karena tingginya intensitas pelemahan akustik. Sebaliknya, instrumen akustik berfrekuensi rendah banyak digunakan untuk aplikasi laut dalam.

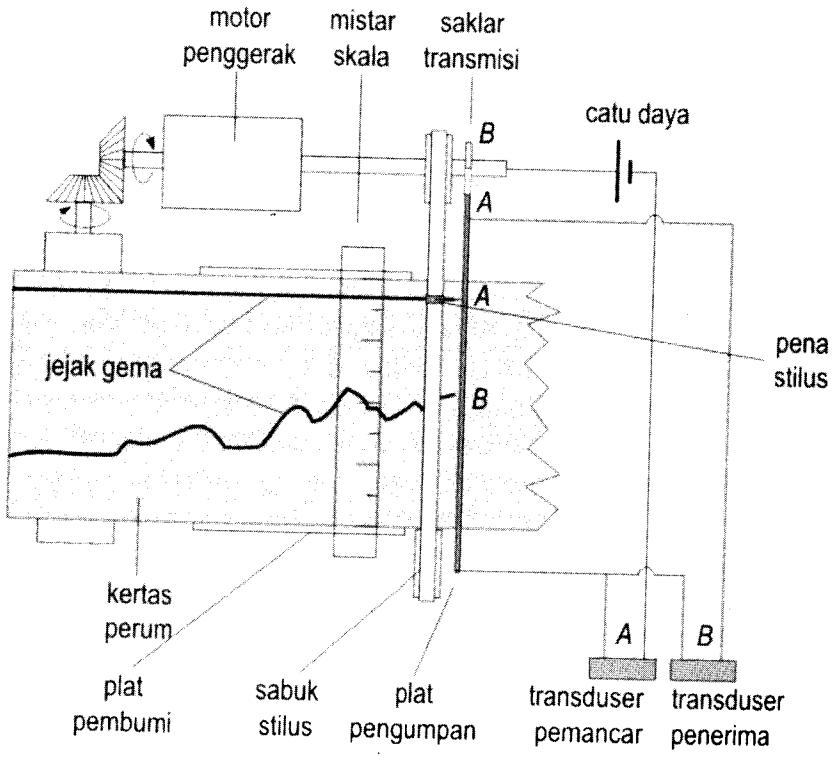
b. Alat Perum Gema

Alat perum gema bekerja pada kisaran frekuensi antara 12 hingga 700 kHz dan gelombang sekitar 10^{-4} hingga 10^{-3} s. Gelombang akustik dibangkitkan dengan sudut pancaran antara 5 hingga 15°. Tingkat pembangkitan gelombang berada pada rentang intensitas antara 200 hingga 230 dB. Transducer merupakan bagian penting dari sebuah alat perum gema yang dibuat dari bahan yang bersifat *piezo electric*. Bahan yang bersifat

demikian akan bergetar jika dikenai listrik dan sebaliknya, membangkitkan listrik ketika digetarkan.

Pada alat perum gema, listrik dibangkitkan dengan sebuah catu daya melalui sebuah *switching unit* dan dialirkan ke transduser, kemudian dikonversi menjadi pulsa gelombang suara. Pulsa gelombang suara yang dipantulkan oleh dasar laut diterima kembali oleh transduser penerima dan dikonversi kembali menjadi energi listrik yang diperkuat oleh sebuah *amplifying unit*. Energi listrik hasil penguatan tersebut direkam pada sebuah unit secara mekanik (dengan kertas perum gema atau *echogram*), secara elektronik-analog (pada pita magnetik) atau secara digital (pada unit penyimpan eksternal; untuk keperluan ini, biasanya alat perum gema dihubungkan dengan sebuah komputer).

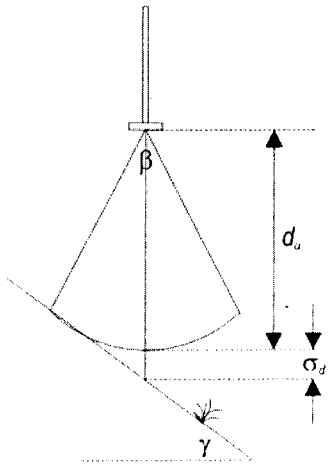
Gambar 4.11 memperlihatkan bagian-bagian utama sebuah alat perum gema. Selain mengalirkan listrik ke transduser, catu daya juga menggerakkan motor, sabuk stilus (dengan pena stilus yang terpasang pada sabuk) dan



Gambar 4.11 **Bagian-bagian utama alat perum gema (dimodifikasi dari KBK Kelautan, 1989)**

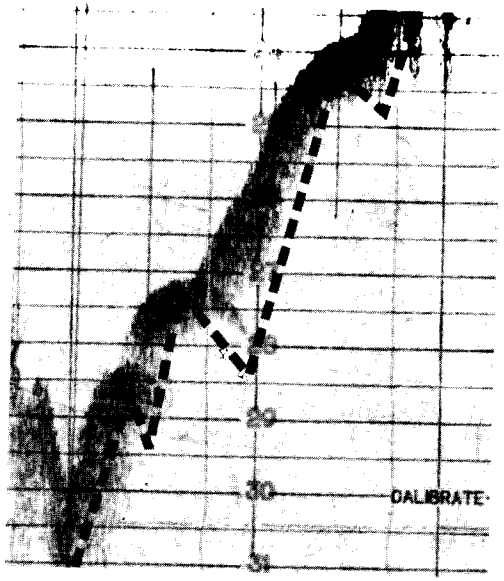
saklar transmisi. Pada kedudukan saklar transmisi di posisi *A*, saklar tersambung dengan plat pengumpan dan mengalirkan listrik ke transduser pemancar *A*. Pada saat yang sama, pena stilus juga teraliri listrik dan menggoreskan jejak gema di posisi *A* pada kertas perum. Saat kedudukan saklar transmisi di posisi *B*, saklar terpisah dengan plat pengumpan dan aliran listrik ke transduser pemancar *A* terhenti. Transduser penerima *B* yang dibangkitkan oleh gelombang pantul dari dasar laut yang dikonversi dan diperkuat akan mengaktifkan pena stilus untuk menggoreskan jejak gema di posisi *B* pada kertas perum.

Bentuk gelombang yang dibangkitkan melalui transduser sebuah perum gema akan berbentuk seperti pancaran yang menghasilkan jejak (*footprint*) berbentuk lingkaran pada dasar perairan. Jari-jari lingkaran yang dibentuk sebanding dengan kedalaman yang diukur. Sudut pancaran gelombang dari transduser membentuk lebar pancaran β sehingga pada profil dasar perairan dengan kemiringan γ akan terjadi kesalahan pengukuran σ_d akibat dari pantulan gelombang yang berasal dari pancaran pada sisi luar (Gambar 4.12).



Gambar 4.12 **Kesalahan pengukuran akibat lebar pancaran gelombang**

Akibat pengaruh lebar pancaran gelombang tersebut, rekaman kedalaman yang diukur oleh perum gema pada puncak-puncak dari perbedaan kedalaman yang ekstrem akan membentuk kurva-kurva setengah lingkaran. Gambar 4.13 memperlihatkan rekaman kedalaman pada kertas perum dan dugaan profil dasar perairan (garis putus putus) yang ekstrem.



Gambar 4.13 **Rekaman profil kedalaman pada perubahan kedalaman perairan yang ekstrem**

Ketelitian pendeteksian perubahan kedalaman pada alat perum gema juga dipengaruhi oleh panjang pulsa, yaitu jarak antar pembangkitan gelombang. Jika perubahan kedalaman lebih kecil dari setengah panjang pulsa, maka perubahan tersebut tidak akan terdeteksi oleh perum gema. Perum gema hanya dapat mendeteksi perubahan kedalaman yang lebih besar dari setengah panjang pulsanya. Lebar pancaran gelombang dan panjang pulsa merupakan keterbatasan alat perum gema yang berasal dari desain dan kemampuan teknologi pemeruman hingga saat ini, sehingga pada umumnya ketelitian pengukuran kedalaman dengan teknik akustik ini berkisar pada angka 1 dm. Jika profil kedalaman yang rinci diperlukan, maka harus dilakukan interpretasi terhadap hasil perekaman data pada kertas perum.

c. Sumber Kesalahan dan Kalibrasi

Sumber-sumber kesalahan dalam operasi pengukuran kedalaman dengan alat perum gema di lapangan ditunjukkan oleh Tabel 4.1. Kesalahan-kesalahan tersebut dapat terjadi sendiri-sendiri atau bersamaan. Hampir semua sumber kesalahan yang ditunjukkan tersebut merupakan kesalahan sistematik, sehingga dapat didesain cara mengatasinya untuk mendapatkan hasil pengukuran yang benar.

Tabel 4.1 Sumber kesalahan pengukuran kedalaman dengan perum gema (KBK Kelautan)

SUMBER	KESALAHAN	KONDISI
Perum gema	Pengesetan pulsa awal	Goresan saat pena stilus mendapatkan arus listrik dari gelombang pancar tidak berada pada skala 0
	Fase pengukuran	Keterbatasan lebar kertas perum mengakibatkan keterbatasan rentang pengukuran kedalaman
	Mekanisme kerja perekaman jejak gema	Kelelahan bahan dan komponen mekanik pada alat atau ketidakpresisian pemasangan komponen-komponen mekanik alat
	Kestabilan transmisi energi listrik	Ketidakstabilan tegangan catu daya ke alat perum gema atau pada rangkaian listrik pada alat
Kedudukan transduser	Kedudukan vertikal transduser terhadap permukaan laut	Tranduser diletakkan di bawah lunas kapal
	Pemisahan transduser pemancar dengan transduser penerima	Transduser pemancar terpisah dengan transduser penerima
Wahana apung	*Settlement*	Kedudukan kapal yang cenderung tenggelam saat berjalan
	Squat	Kedudukan buritan kapal yang cenderung lebih tenggelam dibanding haluannya saat berjalan
	Laju dan arah gerak wahana apung	Kemampuan pengendalian wahana apung oleh jurumudi
Sifat gelombang akustik	Variasi cepat rambat gelombang	Perubahan kerapatan medium air laut karena perbedaan suhu, tekanan dan salinitas
Kondisi lapangan	Gelombang pantul yang bukan dari dasar laut	Kerumunan ikan di bawah transduser, perbedaan medium rambat yang drastis karena polutan dan sebagainya, aliran air tawar di bawah permukaan air laut, rumput laut dan plankton
	Gelombang permukaan laut	Angin di permukaan laut yang menyebabkan perubahan kedudukan permukaan air
Bidang referensi	Pasut Laut	Perubahan kedudukan vertikal permukaan air laut karena atraksi benda-benda langit

Cara yang efektif untuk menjaga ketelitian pemeruman adalah dengan melakukan kalibrasi menggunakan cakra tera (*bar check*). Kalibrasi ini sangat membantu untuk mendapatkan ukuran kedalaman yang benar akibat beberapa sumber kesalahan sekaligus. *Bar check* terbuat dari lempeng logam berbentuk lingkaran atau segi empat yang digantungkan pada tali atau rantai berskala dan diletakkan di bawah transduser. Tali atau rantai berskala dipakai sebagai pembanding hasil pengukuran dengan alat perum gema. Pembandingan pengukuran kedalaman dilakukan untuk setiap perubahan kedalaman, mulai dari kedalaman 0 hingga kedalaman maksimum yang akan diperum dengan interval 1 m. Kalibrasi dengan *bar check* dilakukan setelah pengesetan pulsa awal nol dilakukan (goresan saat pena stilus mendapatkan arus listrik dari gelombang pancar ditepatkan pada skala 0) dan dimulai dari kedalaman tali skala *bar check* 1 meter. Setelah itu, kedudukan *bar check* diturunkan dengan selang satu meter hingga kedalaman maksimum daerah yang akan diperum. Selanjutnya, dari kedalaman maksimum, tali *bar check* ditarik dengan selang 1 meter hingga kembali pada kedudukan 1 meter.

Berdasarkan mekanisme kalibrasi itu, akan didapatkan jejak seperti tangga pada kertas perum (Gambar 4.14). Anak-anak tangga yang menunjukkan pengukuran kedalaman dengan *bar check* kemudian dibandingkan dengan skala bacaan kertas perum, sehingga didapatkan tabel kalibrasi pemeruman. Tabel kalibrasi tersebut dipakai untuk memberi koreksi pada hasil pengukuran kedalaman.

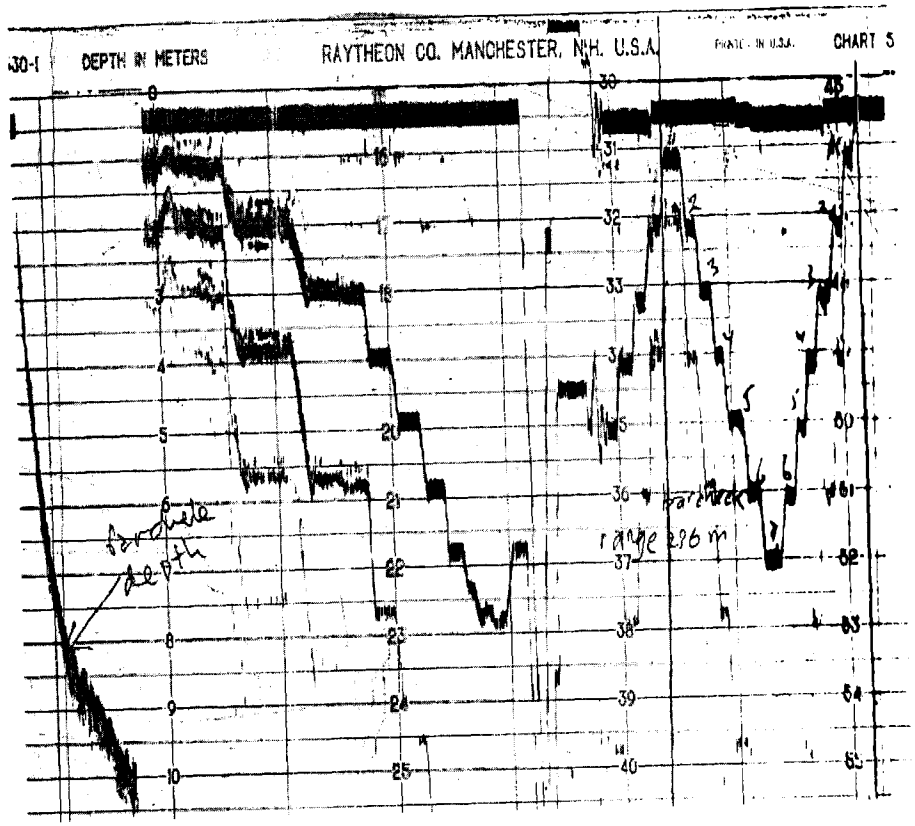
Kalibrasi dengan *bar check* harus dilakukan langsung sebelum dan setelah pemeruman dilakukan pada satu sesi atau satu hari pemeruman. Sebelum pemeruman dilakukan, dipilih suatu kawasan air yang relatif tenang dan dalam dengan kapal yang berhenti untuk kalibrasi awal. Pemilihan lokasi *bar check* pada air tenang dilakukan agar lempeng logam tidak melayang karena arus, sehingga tetap berada di bawah transduser. Kedalaman tempat kalibrasi juga penting untuk memperoleh kedalaman kalibrasi yang maksimum. Data ukuran kedalaman yang telah dikoreksi dengan kalibrasi menggunakan *bar check* dapat dianggap terbebas dari sumber kesalahan karena sifat perambatan gelombang pada medium air laut. Selain kalibrasi dengan *bar check*, data hasil pengukuran kedalaman harus diberi koreksi-koreksi karena kesalahan akibat:

(1) Sarat transduser, dengan mengukur kedudukan (jarak vertikal) permukaan transduser terhadap bidang permukaan laut.

(2) *Settlement* dan *squat* (jika dianggap berarti), dengan membandingkan kedudukan vertikal transduser terhadap permukan air saat kapal

diam dan saat kapal bergerak

(3) Pasut, dengan koreksi tinggi muka air laut sesaat (*sounding datum*) terhadap tinggi bidang referensi vertikal (MSL atau *chart datum*) yang diperoleh dari pengolahan data pengamatan pasut.

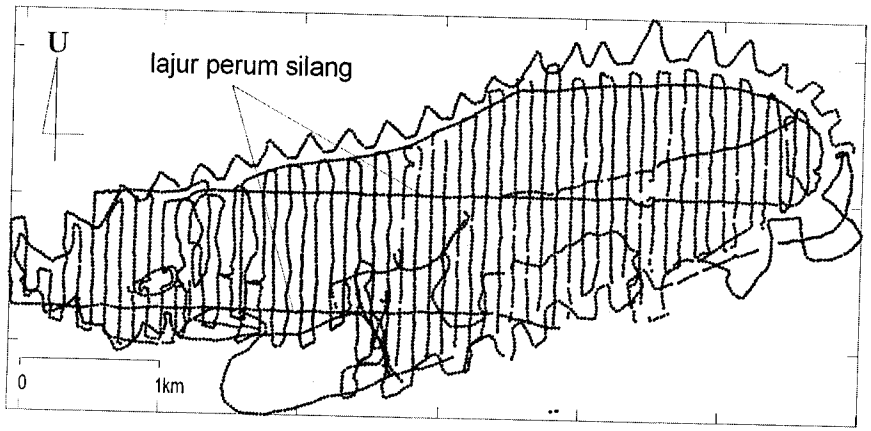


Gambar 4.14 **Kalibrasi perum gema dengan *bar check***

d. Pemeriksaan Data Pemeruman

Lajur-lajur utama pemeruman perlu diperiksa dengan menyelenggarakan lajur silang (*cross sounding*) yaitu lajur perum yang memotong semua lajur utama. Lajur-lajur perum yang memanjang pada arah Timur-Barat pada Gambar 4.15 adalah lajur-lajur silang yang digunakan untuk memeriksa hasil pengukuran lajur-lajur utama. Jika pengukuran dilakukan dengan benar, maka pada titik-titik potong lajur utama dengan lajur silang akan didapatkan hasil pengukuran kedalaman yang sama atau memenuhi toleransi

Informasi tentang toleransi ketelitian pengukuran kedalaman dapat dilihat pada Lampiran D. Jika selisih kedalaman yang diperoleh pada perpotongan lajur utama dengan lajur silang melebihi toleransi, maka pengukuran pada lajur utama yang bersangkutan harus diulang.



Gambar 4.15 **Lajur-lajur perum utama (Utara-Selatan) dan lajur-lajur perum silang (Timur-Barat)**

Pengukuran kedalaman pada lajur perum utama akan menghasilkan potongan atau profil yang kontinu, sementara data kedalaman yang berada di antara dua lajur perum dianggap mengikuti kedalaman yang diperum dengan teknik interpolasi data. Pada kenyataannya di lapangan, mungkin saja terjadi suatu kondisi kedalaman yang berbeda jauh dengan kedalaman pengukuran pada lajur perum, misalnya tonjolan karang, tiang pancang dalam air dan sebagainya. Untuk itu, dilakukanlah teknik *sweeping*, yaitu suatu cara merapatkan pengambilan data yang berada di antara dua lajur perum. *Sweeping* dapat dilakukan secara mekanik, dengan batang baja yang digantungkan pada dua sekoci perum yang mengikuti jejak lajur perum utama. *Sweeping* dapat pula dilakukan dengan metode akustik, yaitu dengan alat *side scan sonar* yang bekerja menggunakan gelombang akustik untuk mendapatkan citra dasar perairan. Interpretasi terhadap citra dilakukan dalam mengidentifikasi anomali kedalaman yang tidak terdeteksi dengan pemeruman biasa. Pemeriksaan ini disebut deteksi anomali kedalaman yang harus dilakukan di antara lajur-lajur perum utama bila survei ditujukan untuk perencanaan

jalur navigasi di sekitar pelabuhan. Anomali kedalaman adalah kedalaman ekstrem relatif terhadap kedalaman perairan sekitarnya.

C. DETIL SITUASI DAN GARIS PANTAI

Detil situasi yang dimaksud disini adalah unsur-unsur yang terdapat di sepanjang pantai, yang seringkali ikut tergambarkan pada peta-peta laut. Untuk keperluan pelayaran, detil situasi dibutuhkan oleh pelaut untuk melakukan navigasi secara visual. Artinya, detil tersebut dibutuhkan oleh pelaut untuk membantunya dalam penentuan posisi kapal. Secara umum, detil situasi yang terdapat di sepanjang pantai, dapat berupa unsur-unsur alam (misalnya: pohon kelapa, bakau, karang, tebing dan lain-lain) atau buatan manusia (pelabuhan, mercusuar, menara, bangunan dan lain lain). Seberapa jauh detil yang harus diukur untuk keperluan pembuatan peta laut sangat tergantung dari tujuan pembuatan peta lautnya. Yang jelas, semakin besar skala peta yang akan dibuat, akan semakin rapat detil situasi yang harus diukur.

a. Garis Pantai

Garis pantai merupakan garis pertemuan antara pantai (daratan) dan air (lautan). Walaupun secara periodik permukaan air laut selalu berubah, suatu tinggi muka air tertentu yang tetap harus dipilih untuk menjelaskan posisi garis pantai. Pada peta laut biasanya digunakan garis air tinggi *(high water line)* sebagai garis pantai (Gambar 4.16). Sedangkan untuk acuan kedalaman biasanya digunakan garis air rendah *(low water line)*.

Walaupun secara teoritis, garis pantai diambil dari kedudukan garis air tinggi, pada kenyataannya, penentuan garis pantai di lapangan akan menghadapi berbagai kendala dalam penentuan titik representatif yang mewakili batas antar daratan dan perairan pada pantai-pantai dengan karakteristik seperti: pantai lumpur, pantai pasir, pantai batu/batu kersik/batu besar, pantai karang/karang terjal, pantai curam, pantai pepohonan, pantai rerumputan atau pantai buatan. Penentuan garis pantai di lapangan dapat dilakukan dengan ketentuan sebagai berikut:

(a) Untuk daerah pantai yang landai (berpasir), garis pantai ditentukan dengan melihat jejak atau bekas genangan saat air pasang tertinggi.

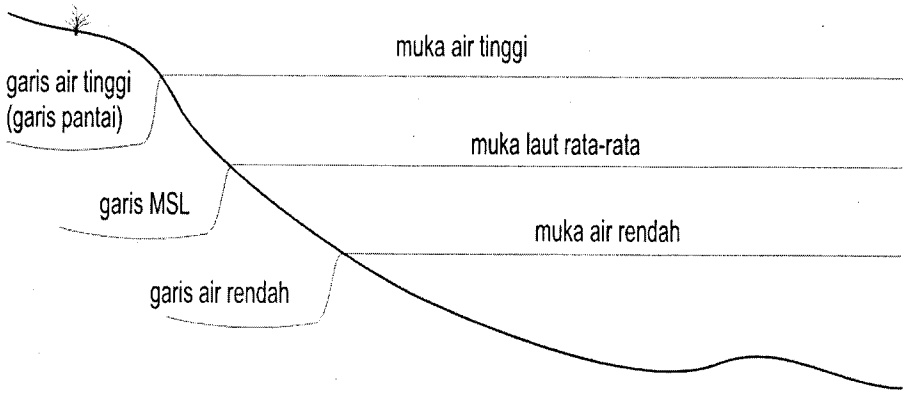
(b) Untuk pantai berlumpur, garis pantai diwakili oleh garis pertemuan antara daratan (tanah keras) dengan lautan. Garis pantai dalam hal

ini diwakili oleh garis air tinggi, berupa jejak permukaan air laut yang paling tinggi yang dapat terjadi pada daratan.

(c) Untuk daerah pantai yang bertebing terjal, garis pantainya adalah bibir tebing tersebut.

(d) Untuk daerah rawa dan tumbuhan semak, garis pantainya adalah batas tumbuhan terluar ke arah laut.

(e) Untuk pantai buatan, garis pantainya diwakili oleh garis batas terluar suatu bangunan permanen buatan manusia yang terletak di pinggir pantai.



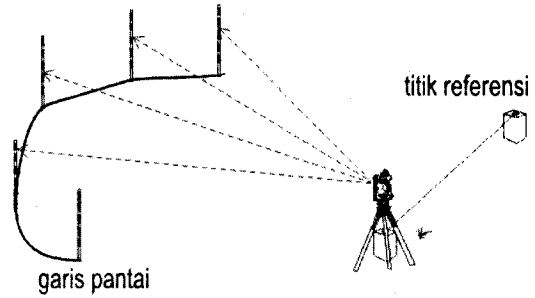
Gambar 4.16 **Garis pantai dari garis air tinggi**

Sebelum kegiatan pengukuran garis pantai dilakukan, sebaiknya terlebih dahulu harus dilakukan survei pendahuluan untuk mengenal karakteristik pantai yang akan ditemui. Hal ini dapat dilakukan dengan cara memeriksa peta-peta lama yang tersedia. Kegiatan ini dapat dianggap sebagai bagian dari kegiatan perencanaan sebelum survei lapangan dilaksanakan. Berdasarkan informasi awal ini, dapat ditentukan metode dan peralatan apa yang akan digunakan untuk penentuan garis pantai.

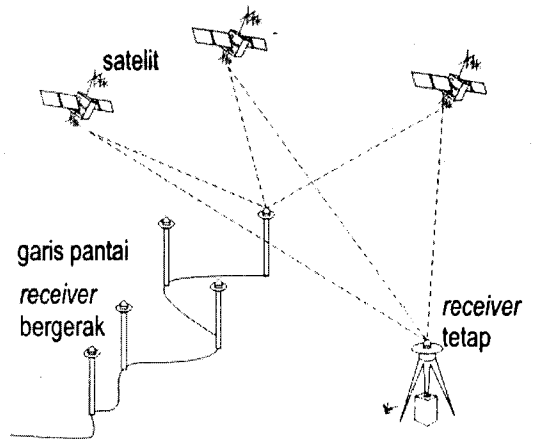
b. Pengukuran Detil Situasi dan Garis Pantai

Pengukuran detil situasi dimaksudkan untuk mengumpulkan data detil pada permukaan bumi (unsur alam maupun buatan manusia) yang diperlukan bagi pelaksanaan pemetaan situasi yang bertujuan memberikan gambaran situasi secara lengkap pada suatu daerah di sepanjang pantai dengan skala tertentu untuk berbagai keperluan. Sedangkan pengukuran garis pantai

dimaksudkan untuk memperoleh garis pemisah antara daratan (permukaan bumi yang tidak tergenang) dan lautan (permukaan bumi yang tergenang). Pada dasarnya, pengukuran detil situasi dan garis pantai juga merupakan kegiatan penentuan posisi titik-titik detil sepanjang topografi pantai dan titik-titik yang terletak pada garis pantai. Dengan demikian, maka teknik GPS dapat diterapkan untuk keperluan pengukuran detil situasi dan garis pantai (Gambar 4.17).



a) Cara terestris



b) Menggunakan GPS

Gambar 4.17 **Pengukuran detil situasi dan garis pantai**

Pengukuran garis pantai dapat pula dilakukan menggunakan cara *offset* atau polar (tacimetri). Untuk keperluan ini, diperlukan sedikitnya sepasang titik kontrol (kerangka dasar) sebagai referensi posisi. Kerapatan titik detil pantai tergantung dari skala peta yang akan dibuat, serta bentuk geometris garis pantai. Semakin besar skala peta, semakin rapat titik detil pantai yang harus diukur. Demikian juga, kerumitan bentuk garis pantai akan memperbanyak titik detil yang harus diukur. Ketelitian detil situasi dan garis pantai yang disyaratkan umumnya adalah 1 mm pada skala peta. Sebagai contoh, untuk peta dengan skala 1:5000, maka ketelitian yang disyaratkan adalah 1 mm x 5000 = 5 m. Jika dikaitkan dengan ketelitian yang dapat dicapai oleh GPS, maka penentuan posisinya harus dilakukan secara diferensial dan cukup menggunakan data *pseudo range* (yang dapat mencapai ketelitian 1 hingga 5 m). Sedangkan jika menggunakan metode *Real Time Kinematic* (RTK) dengan menggunakan data fase, ketelitian yang dapat dicapai adalah 1 hingga 5 cm. Tabel 4.2 memperlihatkan syarat pengambilan detil situasi dan garis pantai untuk beberapa orde ketelitian survei.

Tabel 4.2 Standar ketelitian detil situasi dan garis pantai

	SURVEI ORDE SPESIAL	SURVEI ORDE 1	SURVEI ORDE 2 dan 3
Alat bantu navigasi tetap dan detil penting bagi navigasi	2 m	2 m	5 m
Garis pantai alami	10 m	20 m	20 m
Posisi alat bantu navigasi apung	10 m	10 m	20 m
Detil topografi	10 m	20 m	20 m

D. BEBERAPA KETENTUAN TENTANG KARTOGRAFI PETA LAUT

IHO telah mempublikasikan ketentuan pokok mengenai pemilihan dan penggunaan simbol dan warna yang diterbitkan dengan nama Peta Laut Nomor 1: Simbol-simbol dan Singkatan Peta Laut (*Chart Number 1: Nautical Chart Simbols and Abbreviations*). Publikasi tersebut berisi legenda untuk penggunan simbol (termasuk warna) dan singkatan bagi peta-peta laut yang diterbitkan IHO atau kantor-kantor hidrografi nasional

negara negara anggotanya. IHO telah menetapkan enam aspek kartografi peta laut, yaitu: datum vertikal, datum horisontal, sistem proyeksi, sistem satuan, ketelitian (skala), simbol dan warna (Tabel 4.3).

Tabel 4.3 Aspek kartografi peta laut

ASPEK	KETENTUAN
Datum vertikal	Lokal dengan *chart datum*, disebutkan kedudukan muka surutannya terhadap duduk tengah
Datum horisontal	Titik kontrol horisontal pada elipsoida referensi WGS '84 dalam sistem gratikul (jaring garis proyeksi lintang dan bujur) pada interval 10-20 cm di peta dengan *graduation frame* (skala pembagi gratikul) di tepi-tepi batas muka petanya
Sistem proyeksi	Mercator untuk 75°LU–75°LS Polar Stereografis untuk 75°–90°LU dan 75°–90°LS
Sistem satuan	Metrik, dalam meter atau mil laut
Ketelitian	≥ 1:10.000 untuk bandar, pelabuhan, alur pelayaran dan perairan wajib pandu ≥ 1:20.000 untuk alur pendekat pelabuhan dan perairan lain yang digunakan teratur untuk pelayaran ≥ 1:50.000 untuk daerah pantai sampai kedalaman rata-rata sekurang-kurangnya 30m 1:50.000–1:100.000 untuk daerah dengan kedalaman antara 30m sampai 200m
Simbol dan warna	Peta konvensional: mengikuti Peta Laut No. 1 Peta digital: mengikuti SP-52 IHO tentang Aspek Kartografi ECDIS dan SP-57 IHO tentang Standar Pertukaran Data Digital

Jika data peta laut disajikan dalam wujud digital maka data tersebut harus disimpan dalam format *dxf* (*digital exchange format*) dalam suatu sistem basis data dan pemberian kode yang distandardisasi pula dalam SP 57 IHO. Beberapa perangkat lunak grafis untuk keperluan kartografi digital dapat mengoperasikan format dan sistem basis data ini

Referensi

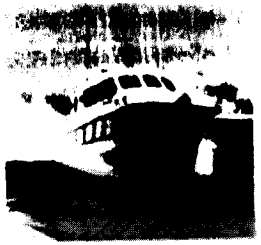
de Jong, C. D., Lachapelle G., Skone, S. & Elema, I. A. (2002). *Hydrography*. Delft University Press. Delft, The Netherlands.

International Hydrographic Organization - IHO (1998). *Standards for Hydrographic Surveys*. Special Publication No. 44, 4th Edition. IHB. Monaco.

Medwin, H. (1975). *Speed of Sound in Water: A Simple Equation for Realistic Parameters*. Journal of the Acoustical Society of America (58), 1318-1319.

Kelompok Bidang Keahlian Kelautan (1989). *Pendidikan Survei Hidrografi ITB-PERTAMINA*. Diktat Kuliah. Jurusan Teknik Geodesi, Institut Teknologi Bandung.

Lurton, X. (2002). *An Introduction to Underwater Acoustics*. Springer – Praxis Publishing. Chichester, UK.



Bab 5

Pengukuran Arus dan Sedimen

A. PENGUKURAN ARUS

Arus adalah gerakan badan air. Di pantai dengan perairan dangkal, arus dapat dibangkitkan oleh pasut, gelombang dan -sampai tingkat tertentu- angin. Pengetahuan mengenai dinamika arus pada suatu wilayah perairan sangat penting untuk kajian mengenai dinamika dan kualitas lingkungan serta rekayasa wilayah. Teknik pengukuran arus dapat dilakukan dengan pendekatan Lagrangian atau Eulerian. Pendekatan Lagrangian dilakukan dengan pengamatan gerakan massa air permukaan dalam rentang waktu tertentu. Implementasinya biasanya dilakukan dengan sebuah pelampung. Selama selang waktu tertentu dan dalam interval waktu yang tertentu pula, pengamat mencatat posisi pelampung tersebut. Studi dinamika arus yang demikian sangat penting -misalnya- untuk mengkaji model tumpahan minyak atau pengangkutan materi oleh badan air di permukaan. Sementara, pendekatan Eulerian dilakukan dengan pengamatan arus pada suatu posisi tertentu di suatu kolom air. Data yang diperoleh dengan pendekatan ini adalah kekuatan dan arah arus pada suatu tempat sebagai fungsi dari waktu. Buku ini hanya akan mendiskusikan teknik pengukuran arus dengan pendekatan Eulerian.

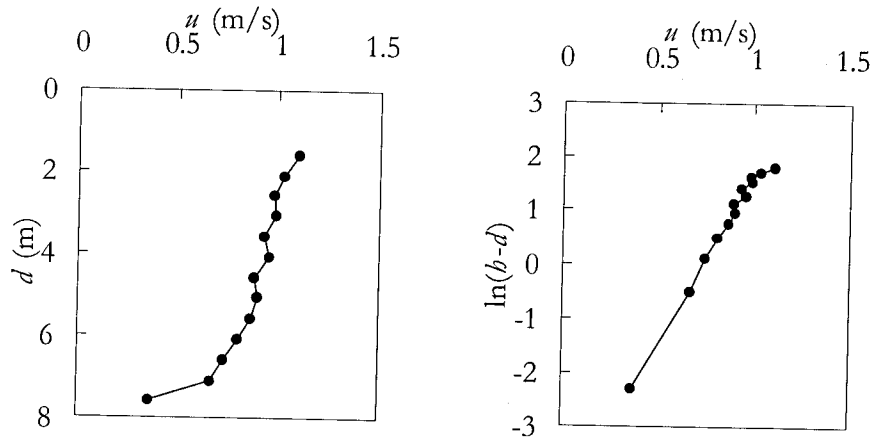
a. Sifat Gerakan Badan Air

Kecepatan arus U pada suatu penampang A merupakan fungsi dari volume air yang dialirkan dalam setiap satuan waktu (Q atau debit) dan luas penampang yang dilaluinya:

$$U = Q/A \qquad (5.1)$$

Di perairan dangkal, badan air yang bergerak 'merasakan' keberadaan dasar perairan. Akibatnya terjadi friksi atau gesekan antara bagian bagian

massa air yang bergerak dengan dasar perairan. Friksi ini mengakibatkan perlambatan yang sistematik pada kekuatan arus di suatu kolom air, sehingga distribusi kekuatan arus *u* di perairan dangkal pada satu vertikal dengan kedalaman total *h* akan membentuk profil logaritmik (Gambar 5.1a). Jika data lapisan-lapisan kedalaman *d* dikonversi ke ekspresi logaritmik normal, maka sebaran data kekuatan arus pada kolom air yang dekat dengan dasar akan cenderung membentuk sebuah garis lurus (Gambar 5.1b).



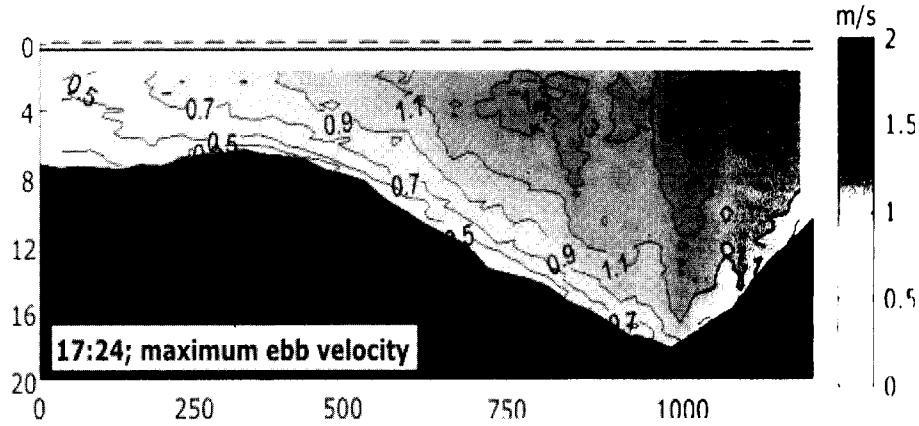
(a) Profil pengukuran kecepatan arus *u* pada kedalaman-kedalaman *d*

(b) Visualisasi profil pengukuran kecepatan arus secara semi-logaritmik

Gambar 5.1 **Profil vertikal kecepatan arus di perairan dangkal dengan kedalaman h**

Perlambatan sistematik pada aliran arus di perairan dangkal juga berlaku pada aliran badan air di sungai atau kanal buatan. Dinding-dinding kanal memperlambat aliran arus secara sistematik sehingga kecepatan arus tertinggi terletak di tengah-tengah kanal. Di perairan dangkal, morfologi dasar perairan mempengaruhi distribusi vertikal profil kecepatan arus. Morfologi dasar perairan yang dimaksud adalah kerut yang terjadi akibat usikan gelombang dan arus di perairan dangkal yang disebut sebagai *bedform* atau *bed feature*. Dimensi morfologi dasar perairan biasanya dinyatakan dalam tinggi dan panjang. Tinggi morfologi dasar perairan mempunyai sifat memperlambat gerakan badan air. Akibatnya, distribusi vertikal kekuatan arus dengan kecepatan dan pada kedalaman yang sama akan mempunyai bentuk yang berbeda pada daerah yang memiliki ketinggian morfologi dasar perairan yang berbeda.

Gambar 5.2 memperlihatkan hasil pengukuran arus pada suatu potongan kanal pasut menggunakan teknik akustik dengan resolusi vertikal 0.5 m dan resolusi horisontal sekitar 6 m saat menjelang surut. Perlambatan sistematik terlihat dengan perbedaan kekuatan arus di dekat laut dasar dan di dekat permukaan air.



Gambar 5.2 **Hasil pengukuran arus pada suatu penampang kanal pasut (Poerbandono & Mayerle, 2005)**

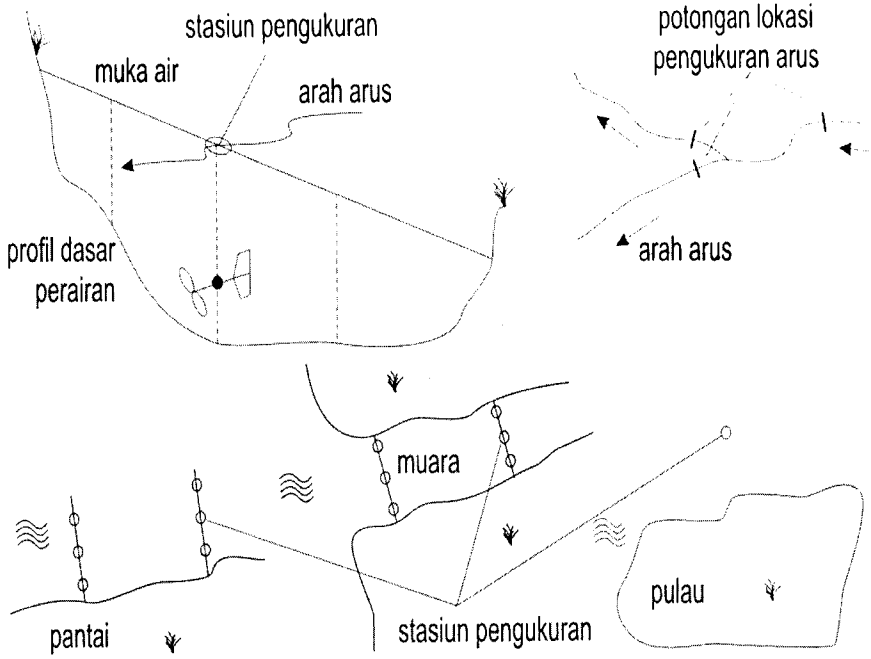
Morfologi dasar perairan cenderung terbentuk di wilayah pantai yang berpasir. Pada kondisi pantai berpasir yang memperoleh pengaruh arus dan gelombang yang cukup kuat, butiran-butiran pasir relatif lebih mudah dipindahkan untuk membentuk kerut-kerut di dasar perairan. Sementara, karena memiliki sifat kohesif, butiran-butiran lumpur cenderung saling tarik menarik dan terpadatkan sehingga lebih sulit dipindahkan oleh arus dan gelombang. Akibatnya, di wilayah pantai yang mengandung lumpur, morfologi dasar perairan cenderung tidak terbentuk. Efek perlambatan pada gerak badan air relatif lebih lemah pada lingkungan ini. Kondisi yang lebih kompleks terjadi pada sistem estuari tempat bercampurnya air tawar dan air asin serta terakumulasinya sedimen yang dibawa oleh sungai dari hulu. Pada lingkungan ini, kadang-kadang terjadi, alat perum gema tidak mampu mendeteksi kedalaman karena adanya lumpur cair (*fluid mud*) yang bergerak dengan kecepatan sangat rendah di atas dasar perairan yang keras. Pada lapisan lumpur ini, kecepatan arus secara efektif tidak berarti.

b. Prosedur Pengukuran Arus

Pada lingkungan laut yang didominasi oleh pasut, maka durasi pengukuran arus pasut setidak-tidaknya adalah sepanjang perioda pasut. Untuk daerah dengan sifat pasut yang diurnal atau campuran, maka durasi pengukuran arus adalah sekurang-kurangnya 25 jam. Sementara, untuk daerah dengan sifat pasut yang semi-diurnal, maka durasi pengukuran arus adalah sekurang-kurangnya 13 jam. Cakupan waktu tersebut sangat diperlukan untuk memperoleh gambaran yang menyeluruh tentang arah dan kecepatan arus pasut pada satu perioda pasut.

Saat pengukuran arus pasut, sebaiknya diatur sedemikian rupa sehingga mewakili kondisi pada saat bulan purnama dan bulan perbani. Untuk itu, pengukuran perlu dijadwalkan selama dua kali dengan selang waktu sekitar 7 hari. Buku pasut yang diterbitkan Dishidros TNI-AL akan sangat membantu dalam mengambil keputusan untuk merencanakan saat pengukuran arus. Interval pengukuran dapat dilakukan setiap 1 jam untuk pengukuran pada pantai yang mempunyai sifat pasut diurnal. Pada pantai yang mempunyai sifat pasut semi-diurnal dan campuran sebaiknya pengukuran dilakukan sekurang-kurangnya dengan interval 30'.

Pemilihan lokasi pengukuran ditentukan berdasarkan pertimbangan kemampuan alat, kondisi lapangan, dan permintaan ketelitian (Gambar 5.3). Jika yang digunakan adalah alat ukur mekanik, maka sebaiknya pengukuran dilakukan di ketinggian sekitar 40% dari dasar perairan. Tempat yang diukur harus mewakili kondisi batimetri perairan setempat. Jika pengukuran dilakukan di suatu sungai atau kanal pasut, maka alat ukur ditempatkan setidak-tidaknya di tengah-tengah sungai dan jika mungkin ditambahkan 2 lokasi antara sumbu dan tepi-tepi sungai. Pada suatu sistem sungai atau kanal pasut (yang bercabang-cabang), pengukuran arus dilakukan pada setiap percabangan. Untuk muara sungai, pengukuran perlu dilakukan pada 2 potongan. Potongan tersebut hendaknya tegak lurus terhadap kecenderungan arah arus. Untuk pantai, pengukuran arus dilakukan pada beberapa potongan tegak lurus garis pantai. Walaupun demikian, keputusan pemilihan lokasi pengukuran akan bervariasi menurut tujuan survei.

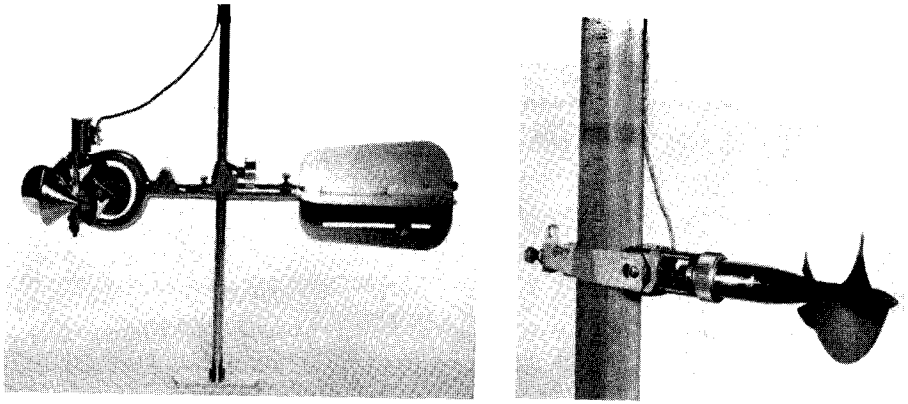


Gambar 5.3 **Beberapa saran penentuan lokasi stasiun pengukuran arus**

Pengukuran arus dengan cara mekanik

Current meter adalah alat pengukur arus yang sangat populer. Pada saat awal dikembangkannya, alat ini bekerja secara mekanik (Gambar 5.4). Badan air yang bergerak memutar baling-baling yang dihubungkan dengan sebuah roda gigi. Pada roda gigi tersebut terdapat penghitung (*counter*) dan pencatat waktu (*time-keeper*) yang merekam jumlah putaran untuk setiap satuan waktu. Melalui suatu proses kalibrasi, jumlah putaran per satuan waktu yang dicatat dari alat ini dikonversi ke kecepatan arus dalam meter per sekon (m/s). Alat ukur ini mempunyai ketelitian pengukuran yang relatif sangat baik. Beberapa desain *current meter* mampu mengukur perubahan kecepatan gerak badan air sampai dengan 1 mm/s. Kini, telah berkembang *current meter* yang bekerja secara elektronik dan mempunyai kemampuan perekaman data yang sangat besar.

Hingga dewasa ini, *current meter* sangat umum dipakai untuk mengukur arah dan kecepatan arus pada suatu lokasi dengan ketinggian tertentu dari



a) *USGS Price Type AA*

b) *Neyrpic Dumas*

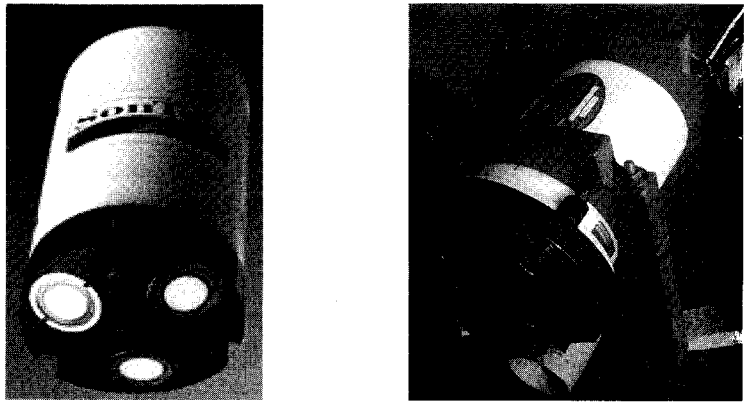
Gambar 5.4 **Beberapa tipe awal *current meter* mekanik**

dasar perairan. Kedalaman pengukuran yang dipilih biasanya sekitar 60% dari permukaan air (atau 40% kedalaman dari dasar perairan). Pada kedalaman tersebut kecepatan yang terukur biasanya sama dengan kecepatan arus rata-ratanya. Jika pada suatu kolom air diperlukan lebih dari satu data pengukuran arus, maka akan diperlukan dua atau lebih *current meter* yang digantung pada kedalaman pengukuran yang berbeda. Keputusan mengenai jumlah alat yang dipakai pada suatu kolom pengukuran akan sangat tergantung pada kebutuhan dan penggunaan data pengukuran tersebut, ketersediaan sumberdaya (alat dan biaya) dan kondisi lapangan (utamanya sifat gerakan badan air).

Pengukuran arus dengan cara akustik

Teknik pengukuran arus yang saat ini merupakan *state-of-the-art* dilakukan dengan memanfaatkan gelombang akustik. Beberapa diantaranya adalah *Acoustic Doppler Profiler* (ADP) dan *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) (Gambar 5.5). Pada alat ini, gelombang akustik dipancarkan melalui transduser dan merambat di sepanjang kolom air. Pada suatu lapisan air yang diukur kecepatan arusnya, gelombang dipantulkan kembali menuju transduser oleh partikel sedimen dan plankton (yang bergerak dengan kecepatan sama dengan kecepatan gerak air). Karena adanya gerak relatif pemantul gelombang terhadap alat ukur arus akustik, maka gelombang yang

diterima akan mengalami efek Doppler atau berubah frekuensinya. Perubahan frekuensi ini sebanding dengan perbedaan kecepatan antara alat ukur arus akustik dengan lapisan arus yang diukur. Alat ukur arus akustik memiliki beberapa kelebihan dibandingkan *current meter* konvensional. *Current meter* mempunyai sifat mengganggu badan air yang diukur (*intrusive*), sementara alat ukur arus akustik cukup dioperasikan dari permukaan air dengan posisi menghadap ke dasar perairan. Resolusi spasial dan temporal alat ukur arus akustik juga jauh lebih baik dibanding *current meter*.



(a) *Acoustic Doppler Profiler* (ADP) produksi SonTek Inc.

(b) *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) produksi RD Instruments (Foto: Gatot H. Pramono)

Gambar 5.5 **Beberapa jenis produk alat ukur arus akustik**

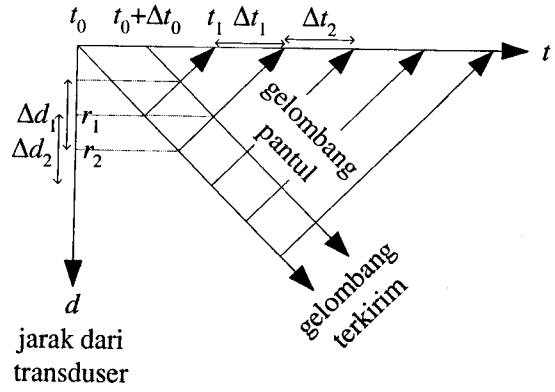
c. Prinsip Pengukuran Arus dengan Cara Akustik

Efek Doppler adalah fenomena kesetaraan perubahan frekuensi suatu bunyi (yang diterima oleh pengamat) dengan perubahan kecepatan sumber bunyi. Peristiwa ini biasanya dijelaskan dengan peluit kereta api yang terdengar meninggi saat mendekati pengamat dan merendah saat kereta api menjauhi pengamat. Di dalam air terdapat material-material padat yang tersuspensi (misalnya: sedimen, plankton dan lainnya) dan bergerak dengan arah dan kecepatan yang sama dengan arus. Jika gelombang akustik dengan frekuensi dan intensitas tertentu dibangkitkan dan ditembakkan ke suatu kolom air,

maka material-material padat tersuspensi pada lapisan air yang diukur akan memantulkan gelombang yang ditembakkan tersebut kembali ke pembangkit. Karena material pemantul bergerak relatif terhadap sumber gelombang, maka frekuensi gelombang pantul akan mengalami efek Doppler. Jika perbedaan frekuensi gelombang pantul relatif terhadap gelombang pancar diketahui, maka kecepatan relatif antara pembangkit gelombang dengan lapisan air yang diukur akan dapat dihitung.

Kekuatan Arus

Melalui transduser, alat ukur arus akustik menembakkan gelombang akustik (*ping*) dengan panjang gelombang sekitar 10 µs dan 'mendengarkan' pantulannya. Alat ukur arus akustik kemudian mengukur frekuensi gelombang pantulnya dan menghitung kecepatan relatif arus pada lapisan air yang diukur terhadap alat ukur arus akustik (Simpson, 2001). Penggerbangan waktu dilakukan untuk memperoleh profil kecepatan arus di sepanjang kolom air (Gambar 5.6). Ketika transduser bergetar dan mulai mengirim gelombang akustik ke kolom air dengan frekuensi tertentu (f_0) selama selang waktu Δt_0, alat pencatat waktu mulai bekerja dan menandai saat pengiriman tersebut (dengan $t = t_0$). Sebelum menerima pantulan gelombang dari badan air, transduser terdiam sejenak. Setelah waktu terdiam tersebut, transduser



Gambar 5.6 **Penggerbangan waktu (Δt_i) untuk mendapatkan data kekuatan arus di suatu kolom air pada lapisan-lapisan (Δd_i) yang diukur (Poerbandono, 2005a)**

mulai menerima pantulan gelombang akustik dengan frekuensi f_1 dari lapisan air yang pertama (yang terdekat dengan transduser). Alat pencatat waktu menandai saat penerimaan tersebut (dengan $t = t_1$).

Dari pengetahuan mengenai cepat rambat gelombang akustik v_s dalam m/s dan selang waktu $\Delta t_1 = t_1 - t_0$ dalam s, maka jarak dari transduser ke lapisan air yang pertama diukur (r_1) dalam meter akan diketahui dari hubungan:

$$r_1 = v_s \, \Delta t_1 \qquad (5.2)$$

Kemudian dengan memanfaatkan efek Doppler, perbedaan frekuensi Δf_1 dipakai untuk menghitung perbedaan kecepatan arah arus relatif Δv_1 pada lapisan air yang diukur. Penggerbangan waktu ini dilakukan sampai dengan lapisan air yang terbawah (terdekat dengan dasar perairan untuk alat yang menghadap ke bawah) atau teratas (terdekat dengan permukaan air untuk alat yang menghadap ke atas). Dalam terminologi ADCP, lapisan-lapisan air yang diukur pada sepanjang kolom pengukuran disebut sebagai *bin*, sedangkan kolom pengukuran itu sendiri disebut sebagai *ensemble* (Gordon, 1996). Ketebalan *bin* diatur oleh selang waktu dalam penggerbangan waktu. Semakin panjang rentang waktunya, maka *bin* pun akan semakin tebal dan sebaliknya. Satu *ensemble* dapat merupakan rekaman satu *ping* atau rata-rata dari beberapa *ping*. Pada selang-selang waktu Δt_i, terkumpul satu atau lebih *ping* yang dirata-ratakan untuk mendapatkan gelombang representatif yang mewakili *bin* (Δd_i) yang diukur. *Bin* pertama (dengan ketebalan Δd_1) berjarak r_1 dari transduser dan merupakan rata-rata terbobot (dengan bobot terbesar diberikan pada gelombang pantul dari $d = r_1$) dari gelombang pantul selama Δt_1.

Arah Gerak

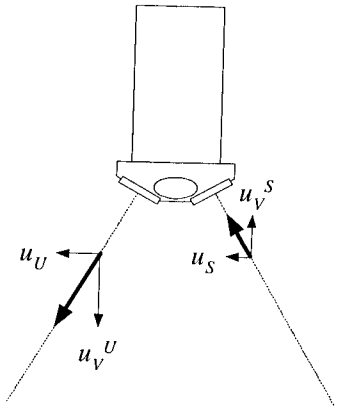
Alat ukur arus akustik menentukan arah gerakan badan air pada lapisan yang diukur dengan memanfaatkan konfigurasi multi transduser. Sebagai ilustrasi, ADCP mempunyai empat transduser yang menghadap ke empat arah yang berbeda dengan kemiringan masing-masing terhadap sumbu tegak sebesar 20°. Kedua pasang transduser ADCP tersebut membentuk sistem koordinat kartesian yang disebut sebagai sumbu Utara untuk dua pasang transduser yang saling bertolak belakang dan sumbu Timur untuk dua pasang transduser lainnya. Sumbu Utara mendeteksi gerakan badan air pada arah Utara (dan vertikal), sedangkan sumbu Timur mendeteksi gerakan badan air

pada arah Timur (dan vertikal) dan masing-masing disebut sebagai kecepatan Utara dan kecepatan Timur, sehingga kecepatan arus (u) dihitung dengan:

$$u = \sqrt{\bar{u}_U{}^2 + \bar{u}_T{}^2} \qquad (5.3)$$

dengan $\bar{u}_U$ = kecepatan arus representatif pada sumbu Utara dalam m/s dan $\bar{u}_T$ = kecepatan arus representatif pada sumbu Timur dalam m/s. Arah gerak arus (α) pada kuadran I, II, III dan IV dapat dihitung sebagai fungsi dari $\bar{u}_U$ dan $\bar{u}_T$.

Gambar 5.7 memperlihatkan pasangan transduser Utara-Selatan yang masing-masing mendeteksi efek Doppler pada arah bidikan gelombang yang saling bertolak belakang. Proyeksi efek Doppler dari transduser Utara pada sumbu horisontal (u_U) dan proyeksi efek Doppler dari transduser Selatan pada sumbu horisontal (u_S) memberi informasi kekuatan gerak badan air pada bidang horisontal di lapisan yang diukur sebagai komponen kecepatan arus pada sumbu Utara ($\bar{u}_U$). Data proyeksi efek Doppler dari transduser Utara dan Selatan pada bidang vertikal ($u_V{}^U$ dan $u_V{}^S$) memberi informasi kekuatan gerak badan air pada arah vertikal $\bar{u}_V{}^U$.



Gambar 5.7 **Konfigurasi multi transduser pada alat ukur arus akustik untuk mengindera gerak badan air secara tiga dimensi pada suatu lapisan air yang diukur (Poerbandono, 2005a)**

Dengan cara yang serupa, dari pasangan transduser Timur Barat didapatkan masing masing data u_I dan u_{II} yang memberi informasi kecepatan arus pada sumbu Timur (u_T). Dengan cara yang serupa pula, didapatkan data proyeksi efek Doppler pada bidang vertikal ($u_V{}^I$ dan $u_V{}^{II}$) yang memberi informasi kekuatan gerak badan air pada arah vertikal $\bar{u}_V{}^I$. Dalam terminologi ADCP, kelebihan data pengukuran pada arah vertikal disebut sebagai *error velocity*. Informasi ini berguna untuk menguji konsistensi asumsi bahwa arus pada suatu bidang horisontal bergerak dengan kekuatan dan arah yang sama.

Kecepatan arus absolut (relatif terhadap dasar perairan) ditentukan dengan cara yang serupa dengan pengukuran kecepatan arus pada kolom air. Alat ukur akustik memanfaatkan efek Doppler untuk menerima frekuensi yang dipantulkan oleh dasar perairan. Perubahan frekuensi akibat pemantulan dari dasar perairan memberi koreksi atas kecepatan relatif yang diukur terhadap alat. Penginderaan dasar perairan dilakukan dengan memeriksa intensitas gelombang yang diterima. Karena massa jenis dasar perairan relatif lebih tinggi dibanding massa jenis air laut, maka intensitas yang diterima pun lebih kuat dibanding intensitas yang diterima dari kolom air. Dalam terminologi ADCP, teknik ini disebut sebagai *bottom tracking* (Gordon, 1996).

d. Pengolahan dan Penyajian Data Pengukuran Arus

Arus memiliki energi atau kapasitas angkut (*carrying capacity*) yang sebanding dengan kecepatannya. Kapasitas angkut tersebut merupakan representasi dari tekanan (*stress*) yang terjadi akibat gesekan (*friction*) antara lapisan badan air yang bergerak dan dengan dasar perairan. Tekanan yang bekerja di dasar perairan disebut sebagai tekanan geser dasar (*bed shear stress*) dan dinotasikan sebagai τ_b. Pada sisi lain, sedimen di dasar perairan memiliki resistensi atau sifat enggan bergerak yang secara umum sebanding dengan ukurannya sehingga laju pengangkutan sedimen merupakan kesetimbangan antara kapasitas angkut dengan ukuran sedimen. Oleh karenanya, hasil kajian mengenai dinamika badan air merupakan informasi yang penting untuk kajian-kajian lanjutan, seperti: angkutan sedimen, penyebaran nutrien dan oksigen, analisis pencemaran dan sebagainya.

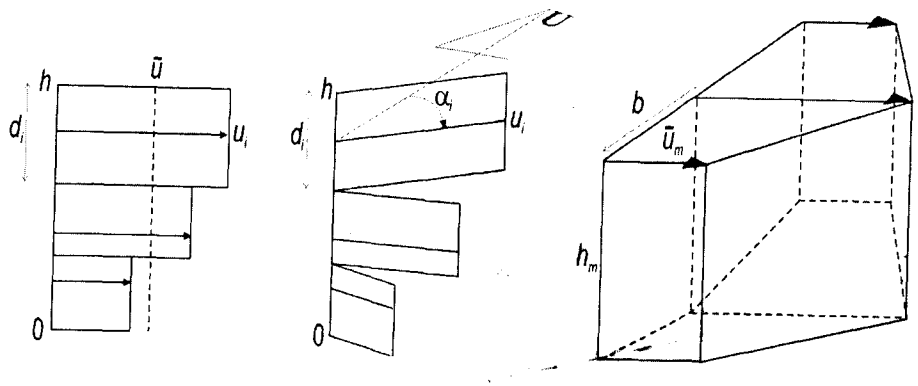
Penghitungan Debit Air

Jika pengukuran arus sepanjang kolom vertikal tersedia, maka nilai representatif pengukuran arus ($\bar{u}$) dari pengukuran di beberapa ketinggian di atas dasar perairan dihitung dengan nilai rata-rata terbobot menurut kedalaman:

$$\bar{u} = \frac{1}{h}\sum_{i=1}^{n-1}\frac{1}{2}(u_i + u_{i+1})(z_{i+1} - z_i) \qquad (5.4)$$

dengan h = kedalaman perairan, z = tinggi pengukuran (dari dasar perairan), n = jumlah pengukuran pada suatu vertikal dan $u(z)$ = kekuatan arus u di ketinggian z. Pada umumnya, kecepatan arus representatif atau yang secara praktis sering disebut sebagai kecepatan arus rata-rata berada pada ketinggian sekitar 40% dari dasar perairan (Gambar 5.8a). Karenanya, jika hanya tersedia sebuah *current meter* maka pengukuran arus direkomendasikan untuk dilakukan pada kedalaman 60% dari permukaan air. Arah arus representatif $\bar{\alpha}$ ditentukan dengan (Poerbandono, 2005b):

$$\bar{\alpha} = \sum_{i=1}^{n} w_i \alpha_i \qquad (5.5)$$



a. Estimasi kecepatan dan arah arus representatif

b. Penghitungan debit air

Gambar 5.8 **Visualiasasi estimasi kecepatan dan arah arus representa dan penghitungan debit air**

dengan bobot $w_i = d_i/h$, α_i = arah arus di satu ketinggian pengukuran dan d_i = jarak vertikal kolom air yang diwakili pengukuran u_i. Jika kecepatan arus representatif telah dihitung, maka debit air (Gambar 5.8b) dapat dihitung dengan:

$$Q = \sum_{j=1}^{m-1}\frac{1}{2}(\bar{u}_j + \bar{u}_{j+1})\frac{1}{2}(h_j + h_{j+1})b_{j,j+1} \qquad (5.6)$$

dengan m = jumlah stasiun pengukuran dan b = jarak lateral antar stasiun pengukuran.

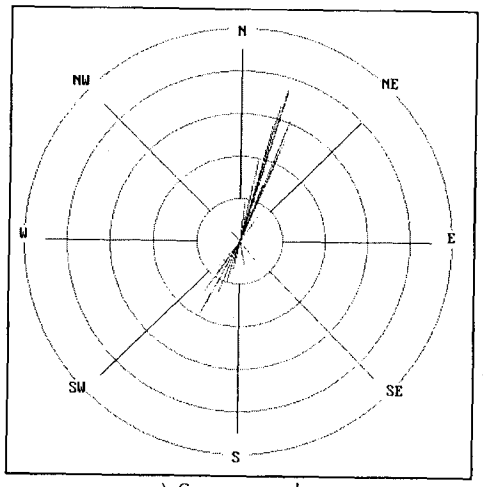
Deskripsi Dinamika Badan Air

Gambar 5.9 memperlihatkan hasil pengukuran arus pada suatu stasiun tetap selama satu siklus pasut. Pada gambar tersebut hasil pengukuran arus (kekuatan dan arah) dengan interval sekitar 1 jam disajikan secara polar (Gambar 5.9a) dan dengan vektor menurut waktu (Gambar 5.9b). Dari gambar tersebut dapat dipelajari pola arus saat air pasang dan air surut yang menunjukkan bahwa komponen arus ke arah Utara relatif lebih dominan dibanding komponen arus ke arah Selatan. Jika arah dan kekuatan arus pasut diasumsikan *bi-directional* dengan kekuatan yang sama, maka residu dari arus pasang dan arus surut dapat dipakai untuk menduga arah dan kekuatan arus tetap yang bukan dibangkitkan oleh pasut.

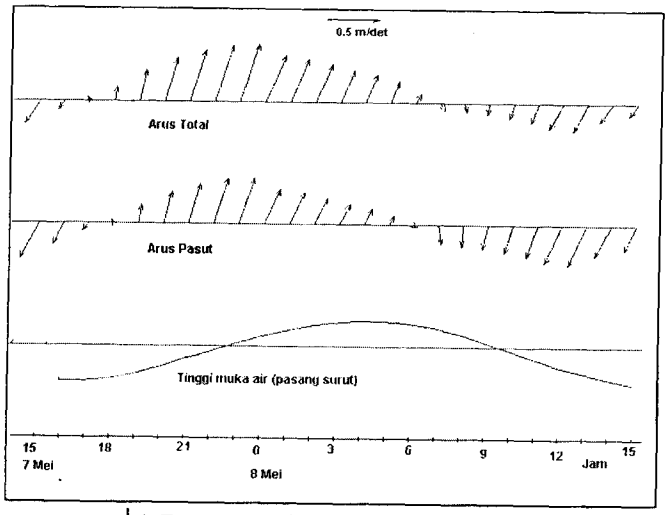
Gambar 5.10 memperlihatkan hasil pengukuran arus sesaat pada beberapa stasiun pengukuran saat menjelang surut. Hasil pengukuran disajikan dengan vektor arus yang menunjukkan secara umum kekuatan dan arah arus di lokasi yang disurvei.

B. PENGUKURAN DAN ANALISIS SEDIMEN

Sedimen adalah bahan utama pembentuk morfologi (topografi dan batimetri) pesisir. Sedimen berasal dari fragmentasi (pemecahan) batuan. Pemecahan tersebut terjadi karena pelapukan (*weathering*) yang dapat berlangsung secara fisik, kimiawi atau biologis. Berubahnya morfologi pesisir terjadi sebagai akibat berpindahnya sedimen yang berlangsung melalui mekanisme erosi, pengangkutan (*transport*) dan pengendapan (*deposition*). Sedimen yang dipindahkan adalah sedimen yang terletak pada permukaan dasar perairan. Agen yang berperan dalam perpindahan sedimen ini adalah

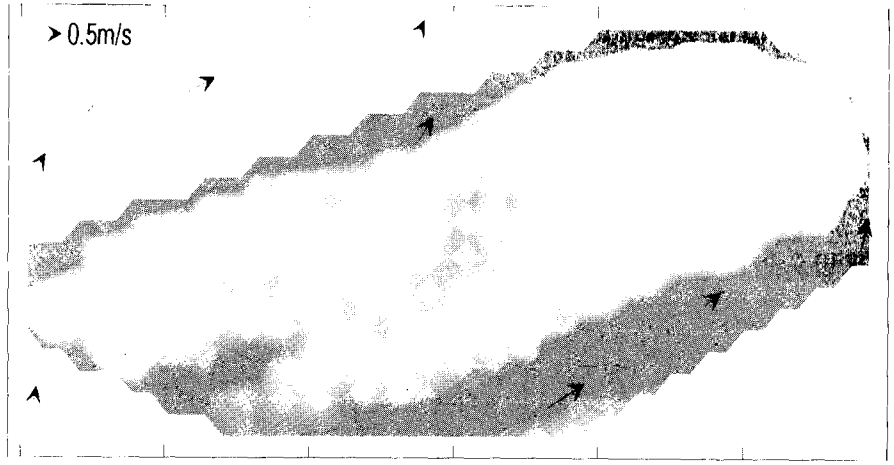


a) Secara polar



b) Dengan vektor menurut waktu

Gambar 5.9 **Visualisasi pengukuran arus pada stasiun tetap selama satu siklus pasut (Ali, 2004)**



Gambar 5.10 **Vektor kecepatan arus dari pengukuran sesaat pada beberapa stasiun pengukuran ketika menjelang surut (dimodifikasi dari Ali, 2004)**

arus. Sebagian besar kandungan sedimen di bumi adalah kuarsa dengan massa jenis rata-rata ρ_s = 2650kg/m^3. Angka tersebut lazim dipakai untuk berbagai aplikasi kajian sedimentasi. Walaupun demikian, pada lokasi-lokasi tertentu, misalnya pantai berterumbu karang atau pantai yang bahan sedimennya didominasi oleh produksi erupsi vulkanik atau bahan organik, massa jenis sedimen rata-ratanya harus ditentukan berdasarkan hasil survei (pengambilan contoh sedimen) setempat.

a. Karakter Sedimen

Sedimen diciri atau dikarakterisasi menurut sifat-sifat alami yang dimilikinya, yaitu misalnya: ukuran butir (*grain size*), densitas, kecepatan jatuh, komposisi, porositas, bentuk dan sebagainya. Dalam studi angkutan sedimen, ukuran butir merupakan karakter sedimen yang sangat penting karena dipakai untuk merepresentasikan resistensinya terhadap agen pengangkut. Ukuran butir sedimen diwakili oleh diameternya yang biasanya disimbolkan sebagai *d*. Satuan yang lazim digunakan untuk ukuran butir sedimen adalah milimeter (mm) dan mikrometer (μm). Berdasarkan ukuran butirnya, sedimen diklasifikasikan menurut: lumpur (*mud*), pasir (*sand*) dan kerikil (*gravel*). Klasifikasi tersebut mengikuti kriteria Wentworth (Wentworth,

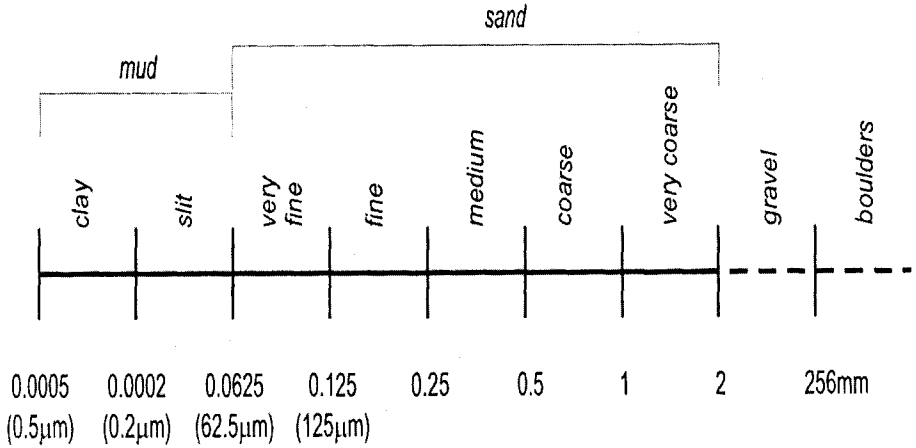
1922). Gambar 5.11 memperlihatkan klasifikasi sedimen menurut ukuran butirnya berdasarkan skala Wentworth. Cara lain untuk menyatakan klasifikasi sedimen berdasarkan ukuran butirnya adalah menggunakan ϕ (*phi*):

$$\phi = -\log_2 d \qquad (5.7)$$

sehingga,

$$d = 2^{-\phi} \qquad (5.8)$$

dengan d dalam mm.

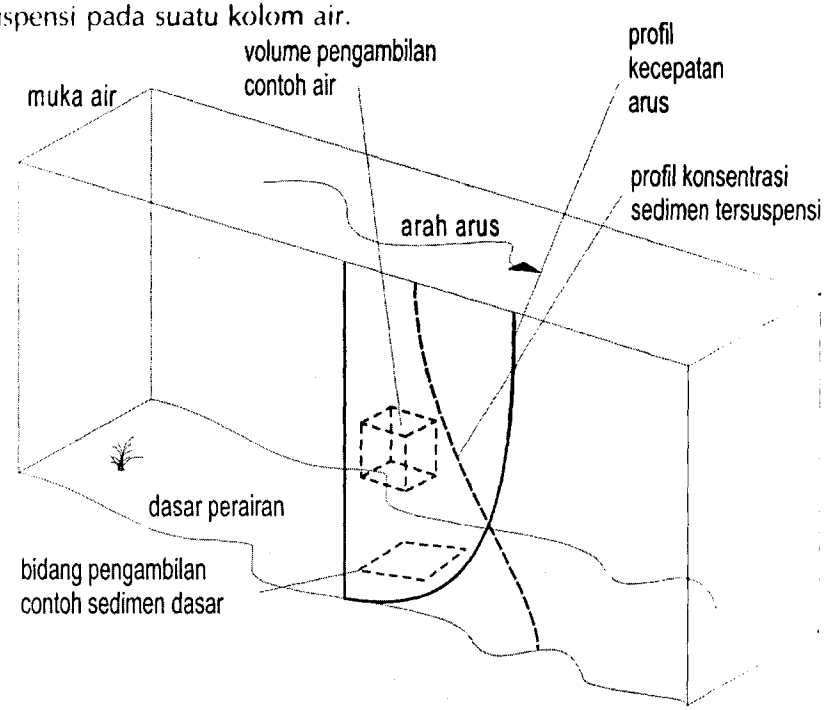


Gambar 5.11 **Skala Wentworth untuk klasifikasi sedimen menurut ukuran butir**

b. Pengambilan Contoh Sedimen

Kajian terhadap contoh sedimen sangat berguna untuk penentuan sifat fisik sedimen serta komposisi kandungannya. Interpretasi terhadap informasi tentang sifat fisik dan komposisi kandungan sedimen sangat penting untuk dikembangkan menjadi kajian lanjutan untuk, antara lain, analisis dinamika batimetri, ketahanan tanah, potensi penambangan atau pencemaran. Sedimen yang berukuran besar (misalnya: pasir kasar dan kerikil) cenderung resisten terhadap gerakan arus. Jika kekuatan arus cukup besar, sedimen tersebut cenderung terangkut dengan kontak yang kontinu (menggelinding, meluncur atau melompat-lompat) dengan dasar perairan. Sedimen yang berukuran lebih kecil (misalnya: lumpur dengan konsentrasi rendah atau pasir halus) cenderung terangkut sebagai suspensi dengan kecepatan dan arah yang

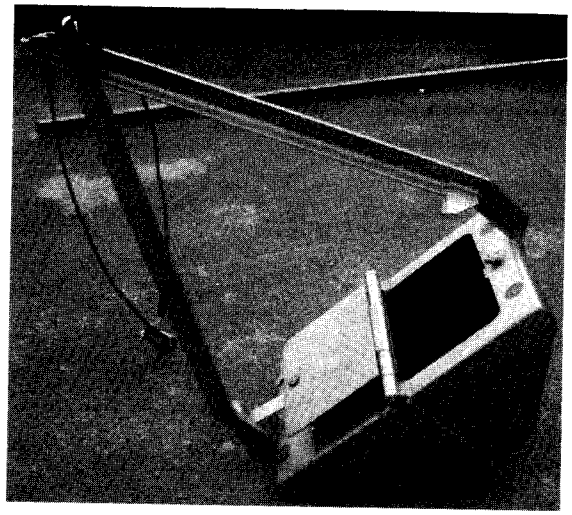
mengikuti kecepatan dan arah arus. Gambar 5.12 memperlihatkan hubungan antara profil kecepatan arus dan konsentrasi sedimen dengan lokasi pengambilan contoh sedimen di dasar perairan dan yang terangkut sebagai suspensi pada suatu kolom air.



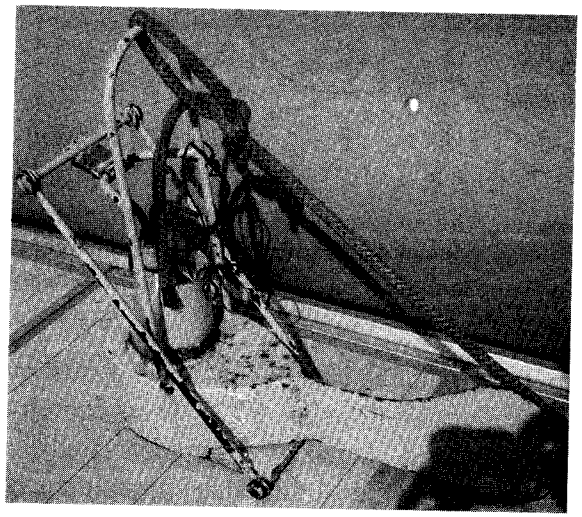
Gambar 5.12 **Visualisasi hubungan antara profil kecepatan arus dan konsentrasi sedimen dengan pengambilan contoh sedimen di dasar perairan dan yang terangkut sebagai suspensi pada suatu kolom air**

Sedimen di dasar perairan dikaji dengan mengambil contoh (*sample*) menggunakan *grab sampler* (Gambar 5.13). Berat contoh sedimen yang diambil bervariasi menurut ukuran *grab sampler* yang digunakan. Pada umumnya, berat contoh sedimen 1 kg sudah cukup untuk dipakai sebagai bahan untuk menganalisis beberapa karakter sedimen dari suatu dasar perairan. Contoh sedimen yang diambil mewakili karakter sedimen yang terletak di lapisan teratas dari suatu dasar perairan.

Selain sedimen yang berada di dasar perairan, terdapat juga sedimen yang terangkut oleh arus sebagai suspensi. Pengukuran sedimen yang terangkut ini dilakukan dengan mengambil contoh air dari suatu kolom pengukuran. Pengambilan contoh dapat dilakukan secara sesaat menggunakan *trap* atau *bottle sampler* (Gambar 5.14). Pengambilan contoh dapat pula dilakukan



Gambar 5.13 **Grab sampler (Foto: Gatot H. Pramono)**



Gambar 5.14 **Bottle sampler (Foto: Gatot H. Pramono)**

menggunakan *pump sampler* untuk mengamati perubahan atau dinamika konsentrasi sedimen dalam selang waktu pengamatan. Teknik pengambilan contoh ini disebut sebagai pengukuran langsung (*direct sampling*). Pengambilan contoh sedimen tersuspensi terutama ditujukan untuk mengetahui konsentrasi

sedimen (atau material padat tersuspensi lainnya) yang diangkut oleh arus. Konsentrasi sedimen dapat dinyatakan secara absolut dalam kg/m^3 (massa sedimen per volume contoh air) atau relatif dalam m^3/m^3 (volume sedimen per volume contoh air).

Cara lain yang dapat dipakai untuk mengukur konsentrasi sedimen tersuspensi adalah dengan teknik optik atau akustik. Cara-cara tersebut digolongkan sebagai pengukuran tak langsung (*indirect sampling*). Pengukuran kekeruhan (*turbidity*). Teknik ini memanfaatkan perambatan (*transmission*) (Gambar 5.15a) atau pembelokan (*scattering*) cahaya tampak (Gambar 5.15b) (biasanya cahaya merah dengan panjang gelombang sekitar 660 nm). Alat yang dipakai biasanya *optical beam transmissometer* untuk sistem transmisi dan *Optical Backscatterance Sensor* (OBS) untuk teknik pembelokan. Pengukuran konsentrasi sedimen dengan teknik akustik (Gambar 5.15c) dilakukan dengan pengukuran intensitas akustik (dari gelombang akustik berfrekuensi tinggi, sekitar 1000 kHz) yang dipantulkan (*backscatter*) oleh sedimen yang terdapat pada kolom air. Pengukuran secara tak langsung dengan teknik optik maupun akustik hanya memberi informasi konsentrasi relatif, oleh karena itu, kalibrasi menggunakan pengambilan contoh langsung harus dilakukan.

Hubungan antara pengukuran optik dengan konsentrasi sedimen untuk teknik transmisi dan teknik pembelokan masing-masing dinyatakan dengan (van Rijn, 1993):

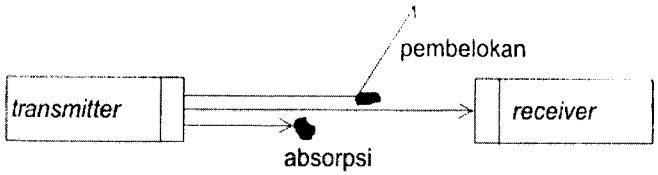
$$\frac{I_t}{I_0} = k_1 e^{-k_2 c} \qquad (5.9)$$

$$\frac{I_s}{I_0} = k_3 e^{-k_2 c} \qquad (5.10)$$

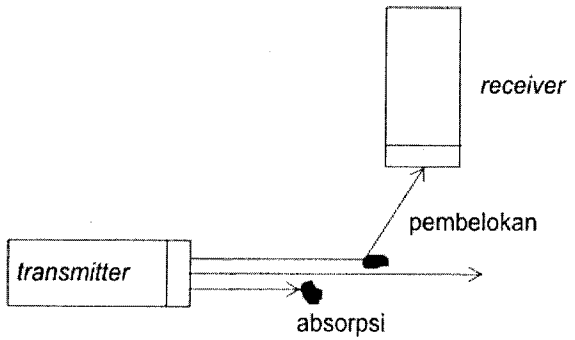
dengan I_t = intensitas perambatan yang diterima *receiver*, I_0 = intensitas yang dikirim melalui *transmitter*, c = konsentrasi sedimen dan k_1, k_2 serta k_3 adalah konstanta-konstanta kalibrasi yang dapat diperoleh melalui analisis regresi menggunakan beberapa data konsentrasi sedimen yang diukur secara langsung.

Hubungan antara pengukuran akustik dengan konsentrasi sedimen secara empirik dinyatakan dengan (Gartner, 2002):

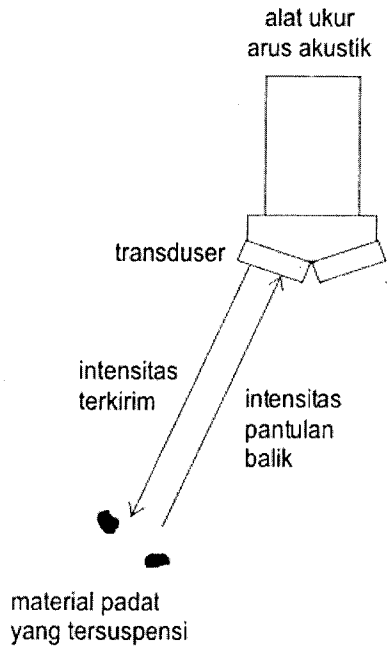
$$10\log(c) = aI + b \qquad (5.11)$$



a) Memanfaatkan perambatan cahaya tampak



b) Memanfaatkan pembelokan cahaya tampak



c) Memanfaatkan pantulan balik gelombang akustik

Gambar 5.15 **Teknik-teknik pengukuran konsentrasi sedimen secara tak langsung**

dengan I = intensitas akustik yang diterima transduser serta a dan b adalah konstanta-konstanta regresi menggunakan beberapa data konsentrasi sedimen yang diukur secara langsung.

c. Analisis Distribusi Ukuran Butir

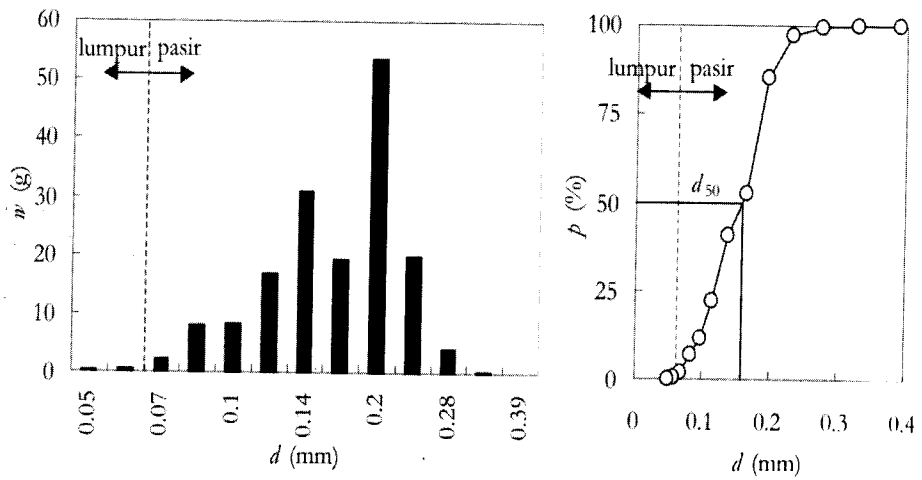
Sedimen di alam tidak akan pernah memiliki ukuran yang seragam. Jika contoh sedimen yang terletak pada suatu permukaan dasar perairan diambil, maka analisis akan menunjukkan bahwa contoh sedimen tersebut terdiri dari berbagai macam ukuran butir. Ukuran representatif yang dipakai untuk mewakili contoh sedimen tersebut biasanya adalah diameter mediannya yang ditentukan menurut berat. Diameter median tersebut dinotasikan sebagai d_{50}, yang artinya: 50% berat contoh sedimen, memiliki ukuran butir yang sama dengan atau lebih kecil dari d_{50} tersebut. Distribusi ukuran butir dari suatu contoh sedimen juga merupakan parameter yang penting dalam studi angkutan sedimen. Menyempit atau melebarnya distribusi ukuran butir dari suatu contoh sedimen dapat ditentukan berdasarkan rentang antara d_{84} dan d_{16}. Dyer (1986) mengelompokkan contoh sedimen yang memiliki $d_{84}/d_{16}<2$ sebagai sedimen yang terurut (*well-sorted*) sedangkan $d_{84}/d_{16}>16$ sebagai sedimen yang tercampur (*well-mixed*). Distribusi ukuran butir dari suatu contoh sedimen dapat pula dinyatakan dengan standar deviasi geometrik (σ_s):

$$\sigma_s = (d_{84}/d_{16})^{0.5} \qquad (5.12)$$

Teknik baku yang dipakai untuk menganalisis sebaran ukuran butir sedimen adalah *sieving*. Untuk itu, contoh sedimen terlebih dahulu dikeringkan, kemudian disaring melalui saringan-saringan yang ukuran kerapatan jaringnya berbeda-beda (terkecil 0.063 mm dan terbesar 20 mm). Contoh sedimen yang tertinggal pada sebuah saringan pasti mempunyai ukuran butir yang lebih besar dari kerapatan jaring pada saringan tersebut dan lebih kecil dari ukuran kerapatan jaring pada saringan sebelumnya. Selanjutnya, sedimen yang tertinggal pada setiap saringan masing-masing ditimbang beratnya. Dari hasil penimbangan tersebut akan diperoleh distribusi berat sedimen berdasarkan rentang ukuran kerapatan jaring saringan. Tabel 5.1 memperlihatkan hasil penimbangan suatu contoh sedimen dasar perairan dengan teknik *sieving*. Dari tabel tersebut dapat dibangun sebuah histogram frekuensi (Gambar 5.16a) dan distribusi kumulatif ukuran sedimen (Gambar 5.16b).

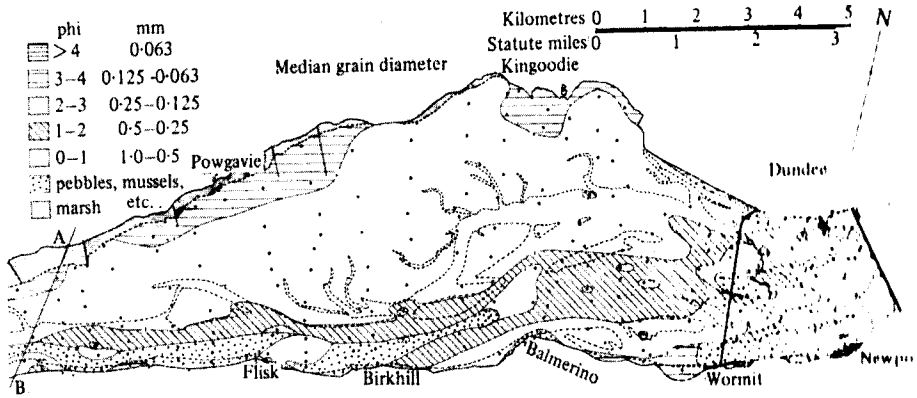
Tabel 5.1 Data hipotetik hasil penimbangan suatu contoh sedimen dasar perairan dengan teknik *sieving*

Diameter Minimum (mm)	Diameter Maksimum (mm)	Diameter Pertengahan (mm)	Massa (g)	Massa (%)	Massa Kumulatif (%)
0.425	0.500	0.46	0.00	0	0
0.355	0.425	0.39	0.10	0	100
0.300	0.355	0.33	0.28	0	100
0.250	0.300	0.28	4.07	2	100
0.212	0.250	0.23	19.99	12	97
0.180	0.212	0.20	53.55	33	85
0.150	0.180	0.17	19.47	12	53
0.125	0.150	0.14	30.90	19	41
0.106	0.125	0.12	16.80	10	22
0.090	0.106	0.10	8.16	5	12
0.075	0.090	0.08	7.94	5	7
0.063	0.075	0.07	2.16	1	2
0.053	0.063	0.06	0.59	0	1
0.045	0.053	0.05	0.36	0	0
TOTAL			164.37	100	



Gambar 5.16 **Hasil analisis contoh sedimen**

Dari contoh yang diberikan pada Tabel 5.1 dan Gambar 5.16, diperoleh beberapa karakter sebaran ukuran butir sedimen, yaitu: d_{50} 0.159 mm, sifat sebaran yang *well sorted*, kandungan lumpur 1% dan standar deviasi geometrik σ_s = 1.36. Data sedimen dasar perairan disajikan dalam bentuk peta sebaran sedimen yang dibangun melalui interpolasi banyak lokasi pengambilan contoh sedimen. Gambar 5.17 memperlihatkan penyajian peta sebaran sedimen dasar perairan menurut diameter mediannya.



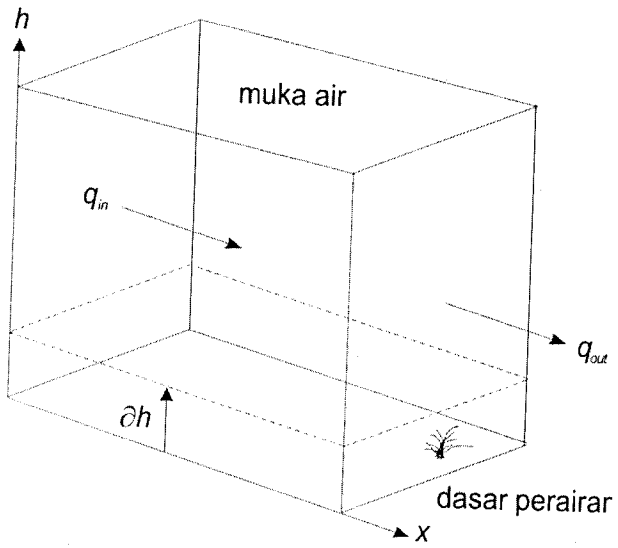
Gambar 5.17 **Peta sebaran sedimen dasar perairan menurut d_{50} di Tay *Estuary*, Inggris (Buller & McManus, 1975)**

d. Analisis Konsentrasi Sedimen

Contoh air yang diambil dari suatu kolom air akan melalui proses filtrasi untuk memisahkan partikel-partikel sedimen dari air melalui sebuah filter. Massa sedimen pada contoh air yang diambil diperoleh dengan menimbang selisih berat kering filter setelah dan sebelum filtrasi. Konsentrasi sedimen diperoleh dengan membagi massa sedimen dengan volume air contoh. Data konsentrasi sedimen tersuspensi diperlukan terutama untuk mengukur laju pengangkutan sedimen (dan material padat tersuspensi lainnya) pada suatu kolom air atau bidang potongan pengukuran. Jika diketahui konsentrasi sedimen c dalam kg/m^3 dan kecepatan arus u dalam m/s, maka laju angkutan sedimen q dalam kg/m^{2}s diperoleh dengan:

$q = uc$ (5.13)

Laju angkutan sedimen q menyatakan massa sedimen yang terangkut pada setiap m^2 luas penampang dalam setiap detik. Informasi laju pengangkutan sedimen dari dua penampang pengukuran ditujukan untuk kajian dinamika batimetri (perubahan elevasi dasar perairan) di antara dua lokasi potongan pengukuran (Gambar 5.18). Pendekatan ini mengasumsikan bahwa tidak ada sumber sedimen lain kecuali yang berasal dari dasar perairan. Pada sistem yang ditujukkan pada Gambar 5.18, jika $q_{in}<q_{out}$ maka kapasitas angkut yang dimiliki arus mengangkat sedimen dari dasar perairan sehingga akan terjadi erosi (pengikisan). Sebaliknya, jika $q_{in}>q_{out}$ maka arus kehilangan sebagian kapasitas angkutnya dan menjatuhkan sedimen yang diangkutnya ke dasar perairan sehingga terjadi deposisi (pengendapan).



Gambar 5.18 **Model perubahan elevasi dasar perairan dengan lebar satu satuan panjang**

Perubahan elevasi dasar perairan per satuan waktu $\partial h/\partial t$ dimodelkan dengan (misalnya: Soulsby, 1997):

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{1}{1-\varepsilon}\frac{\partial q}{\partial x} \qquad (5.14)$$

dengan ε = porositas sedimen. Akresi terjadi ketika $\partial h/\partial t>0$, sebaliknya erosi terjadi ketika $\partial h/\partial t<0$.

Konsep ini dikembangkan untuk kajian pada sistem yang lebih besar, seperti interaksi antara Daerah Aliran Sungai dengan kawasan pesisir. Pasokan sedimen yang diangkut oleh sungai adalah salah satu bahan yang penting untuk menjaga stabilitas pantai sebagai pengganti sedimen yang hilang akibat energi yang bekerja di pantai karena aksi gelombang dan pasut. Dalam hal ini, sumber sedimen lain (selain yang berasal dari dasar perairan) yang berasal dari permukaan tanah pada suatu sistem aliran sungai juga harus diperhitungkan. Kelebihan pasokan dari sungai akan mengakibatkan pengendapan di pantai, sebaliknya kekurangan pasokan sedimen dari sungai akan mengakibatkan mundurnya garis pantai.

Referensi

Ali, M. (2004). *Laporan Pengukuran Arus Pulau Semak Daun*. Tidak dipublikasikan.

Buller, A. T. & McManus, J. (1975). *Sediments of the Tay Estuary. 1. Bottom Sediments of the Upper and Upper Middle Reaches*. Proceedings of Royal Society Edinburgh (75), 41-61.

de Jong, C. D., Lachapelle G., Skone, S. & Elema, I. A. (2002). *Hydrography*. Delft University Press. Delft, The Netherlands.

Dyer, K. R. (1986). *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*. Wiley and Sons, Chichester, England, 2nd edition.

Gartner, J. W. (2002). *Estimation of Suspended Solids Concentrations Based on Acoustic Backscatter Intensity: Theoretical Background*. Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop.

Gordon, R. L. (1996). *Acoustic Doppler Current Profiler: Principles of Operation*. RD Instruments, San Diego, USA, 2nd edition.

Poerbandono & Mayerle, R. (2005). *Measurement of Sediment Transport Dynamics*. Submitted to 'Die Kueste'.

Poerbandono (2005a). *Penggunaan Alat Ukur Arus di Perairan Dangkal. Bagian I: Teknik dan Keterandalan Pengukuran*. Diserahkan ke Jurnal ITENAS.

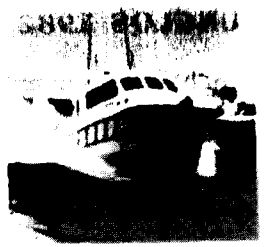
Poerbandono (2005b). *Penggunaan Alat Ukur Arus di Perairan Dangkal. Bagian II: Estimasi Parameter Dinamika Pesisir*. Diserahkan ke Jurnal ITENAS.

Simpson, M. R. (2001). *Discharge Measurements using a Broad Band Acoustic Doppler Current Profiler*. Open File Report of USGS, California, USA.

Soulsby, R. L. (1997). *Dynamics of Marine Sands*. Thomas Telford Publications, London, UK.

van Rijn, L. C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.

Wentworth, C. K. (1922). *A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments*. Journal Geology (30), 377-392.



Bab 6
Penetapan Batas Laut

Penetapan batas laut ditujukan untuk menjamin kepastian hukum tentang batas-batas laut suatu negara pantai (dalam konteks internasional) atau suatu daerah pantai (dalam konteks nasional). Kegiatan penetapan batas laut suatu negara pantai merupakan implementasi dari Konvensi Hukum Laut Perserikatan Bangsa-bangsa (PBB) atau *United Nation Convention of the Law of the Sea* (UNCLOS) yang disepakati sejak tahun 1982 dan resmi berlaku pada tanggal 16 November 1994.

Penetapan batas laut daerah (nasional) di Indonesia mulai banyak dibicarakan setelah dikeluarkannya Undang-undang (UU) No. 22 Tahun 1999, terutama yang tercantum dalam Pasal 3 dan Pasal 10 Ayat 3, yang menyebutkan bahwa wilayah daerah propinsi dan kabupaten atau kota terdiri dari wilayah darat dan wilayah laut, masing-masing 12 mil laut yang diukur dari garis pantai ke arah laut lepas dan atau perairan kepulauan untuk wilayah laut propinsi dan sejauh sepertiganya untuk wilayah laut kabupaten atau kota. Dengan demikian, pemerintah propinsi dan kabupaten atau kota harus menetapkan batas-batas wilayah daerahnya, baik wilayah darat maupun wilayah laut, agar kewenangan yang dimiliki dapat dilaksanakan dengan baik.

Dalam konteks batas laut negara (internasional), ketentuan-ketentuan tentang penetapan batas laut tercantum dalam Konvensi Hukum Laut PBB 1982. Indonesia telah meratifikasi konvensi tersebut melalui UU No. 17 Tahun 1985 pada tanggal 31 Desember 1985, karenanya, Indonesia berkewajiban untuk secara konsisten melaksanakan ketentuan-ketentuan yang tercantum dalam konvensi. Semua produk perundang-undangan nasional tidak boleh bertentangan dengan konvensi, termasuk yang berkaitan dengan penetapan batas laut sebagai salah satu bagian penting dalam penegakkan hukum laut internasional.

A. KONSEP BATAS LAUT BERDASARKAN UNCLOS 1982

Negara-negara pantai berkewajiban menyajikan batas wilayah perairannya dalam bentuk peta laut atau daftar koordinat geografis dari titik-titik dasar (*basepoints*) terluar wilayahnya. Dalam peta laut tersebut harus disajikan informasi yang dibutuhkan bagi pelayaran, serta yang paling penting adalah garis-garis pangkal (*baselines*) yang digunakan untuk mengukur batas-batas wilayah laut (*maritime zone*). Konsep penetapan batas laut yang tercantum dalam konvensi dimaksudkan untuk penentuan wilayah perairan negara-negara pantai di dunia terutama negara-negara yang telah meratifikasi konvensi tersebut.

Dalam UNCLOS 1982 ada beberapa wilayah atau zona perairan yurisdiksi yang ditentukan dari suatu garis pangkal, yaitu:

(1) Perairan Pedalaman (*Internal Waters*): Pasal 8,

(2) Laut Teritorial (*Territorial Sea*): Pasal 3 – 16,

(3) Zona Tambahan (*Contiguous Zone*): Pasal 33,

(4) Zona Ekonomi Eksklusif (*Exclusive Economic Zone*): Pasal 55 – 75,

(5) Landas Kontinen (*Continental Shelf*): Pasal 76 – 85,

(6) Laut Lepas (*High Sea*): Pasal 86 – 120.

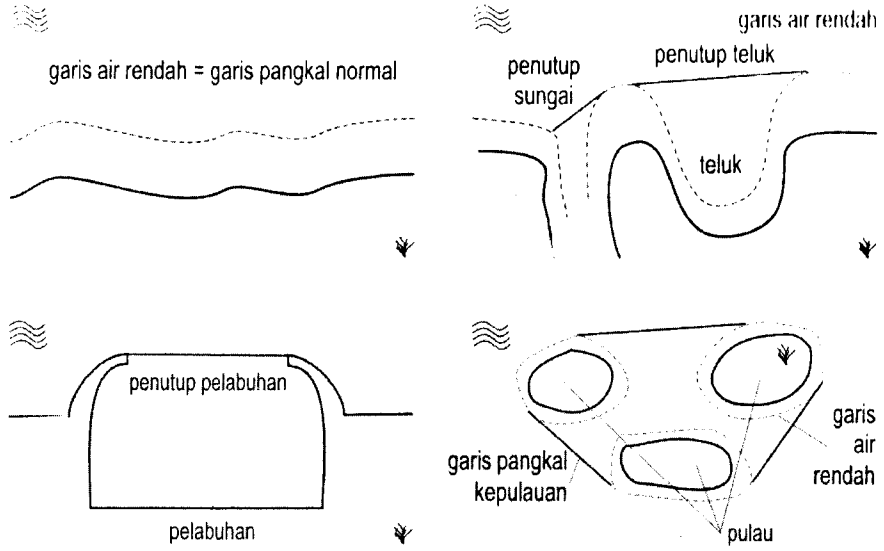
Garis pangkal merupakan acuan penarikan batas terluar (*outer limit*) dari wilayah-wilayah perairan yurisdiksi tersebut. Ada dua macam garis pangkal yang tercantum dalam UNCLOS 1982, yaitu:

(1) Garis pangkal normal (*normal baseline*); dan

(2) Garis pangkal lurus (*straight baseline*), termasuk di dalamnya garis penutup sungai dan teluk serta garis pangkal kepulauan (*archipelagic baseline*).

Garis pangkal normal dapat diartikan sebagai garis air rendah (*low water line*) sebagaimana yang terlihat sebagai garis kedalaman nol pada peta laut skala besar yang diakui secara resmi di negara tersebut. Sedangkan garis pangkal lurus adalah garis lurus yang menghubungkan dua titik dasar yang terletak pada garis air rendah (Gambar 6.1).

Dalam UNCLOS 1982 disebutkan juga bahwa setiap negara pantai bebas menentukan dan memilih garis-garis pangkal yang akan digunakan untuk menetapkan batas wilayah perairannya, asalkan memenuhi beberapa persyaratan yang diatur dalam konvensi. Kewajiban suatu negara pantai berkaitan dengan penetapan batas wilayah perairan adalah menentukan



Gambar 6.1 **Macam-macam garis pangkal**

sendiri garis pangkal wilayahnya dan harus diperlihatkan pada peta laut atau dibuatkan daftar koordinat geografis dari titik-titik dasarnya. Selanjutnya, salinan dokumen tersebut diserahkan kepada Sekretaris Jenderal PBB. Hal khusus yang harus diperhatikan adalah apabila dalam penetapan garis pangkal tersebut berpengaruh pada hak negara pantai yang bersebelahan atau berhadapan.

B. WILAYAH PERAIRAN BERDASARKAN UNCLOS 1982

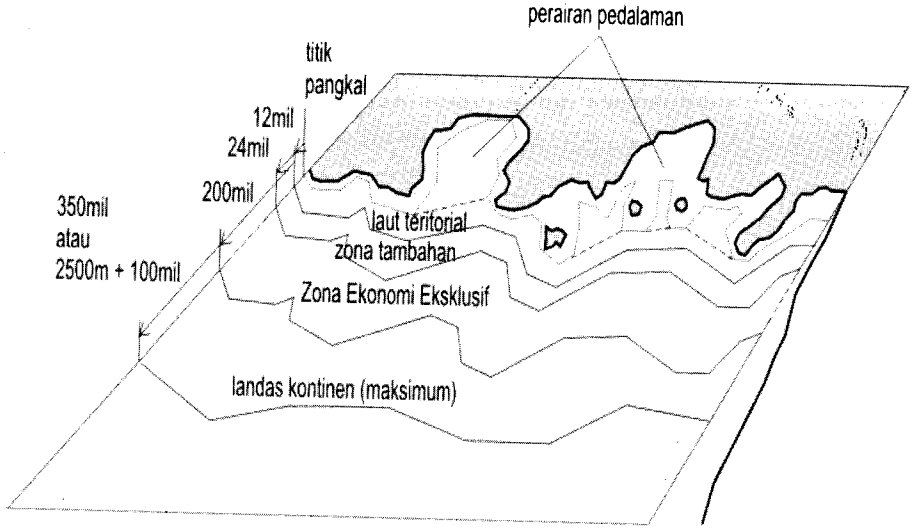
Wilayah-wilayah perairan berdasarkan UNCLOS 1982 ditunjukkan oleh Gambar 6.2 dengan penjelasan sebagai berikut.

a. Perairan Pedalaman

Berdasarkan pasal 8 UNCLOS 1982, perairan pedalaman adalah perairan yang terletak pada sisi darat garis pangkal laut teritorial.

b. Laut Teritorial

Dalam pasal 3 UNCLOS 1982 disebutkan bahwa setiap negara pantai



Gambar 6.2 **Wilayah Perairan berdasarkan UNCLOS 1982**

berhak menetapkan lebar laut teritorialnya hingga suatu batas yang tidak boleh melebihi 12 mil laut, diukur dari garis pangkal yang telah ditentukan. Di dalam kawasan ini, negara pantai mempunyai hak berdaulat atas ruang udara di atas laut teritorial, dasar laut serta tanah di bawahnya. Penarikan garis batas wilayah laut teritorial antara dua negara pantai yang berhadapan atau berdampingan didasarkan pada garis tengah (*median line*) yang titik-titiknya mempunyai jarak yang sama terhadap titik-titik terdekat pada garis pangkal kedua negara, kecuali karena alasan historis atau keadaan khusus. Garis pangkal untuk mengukur lebar laut teritorial harus dicantumkan dalam peta dengan skala yang memadai atau diberikan dalam bentuk koordinat geografis.

c. Zona Tambahan

Zona tambahan dimaksudkan agar negara pantai dapat melaksanakan pengawasan yang diperlukan untuk:

(i) Mencegah pelanggaran peraturan bea cukai, fiskal, imigrasi di dalam wilayah laut teritorial; dan

(ii) Menghukum pelanggaran tersebut di atas yang dilakukan di dalam wilayah laut teritorial.

Zona tambahan tidak boleh melebihi 24 mil laut dari garis pangkal yang digunakan untuk mengukur laut teritorial.

d. Zona Ekonomi Eksklusif

Pada kawasan ini suatu negara pantai mempunyai hak eksklusif untuk melakukan eksplorasi dan eksploitasi, pelestarian dan pengelolaan sumber daya alam (hayati dan non-hayati) di dasar, di bawah dan di atas laut, serta kegiatan lain seperti produksi energi dari air, arus dan angin. Namun demikian, semua negara lain dapat menikmati kebebasan pelayaran dan penerbangan, serta kebebasan meletakkan kabel dan pipa bawah laut, dengan memperhatikan hak dan kewajiban negara pantai serta harus mentaati peraturan yang ditetapkan oleh negara pantai. Lebar zona ekonomi eksklusif tidak boleh melebihi 200 mil laut dari garis pangkal yang digunakan untuk mengukur laut teritorial.

e. Landas Kontinen

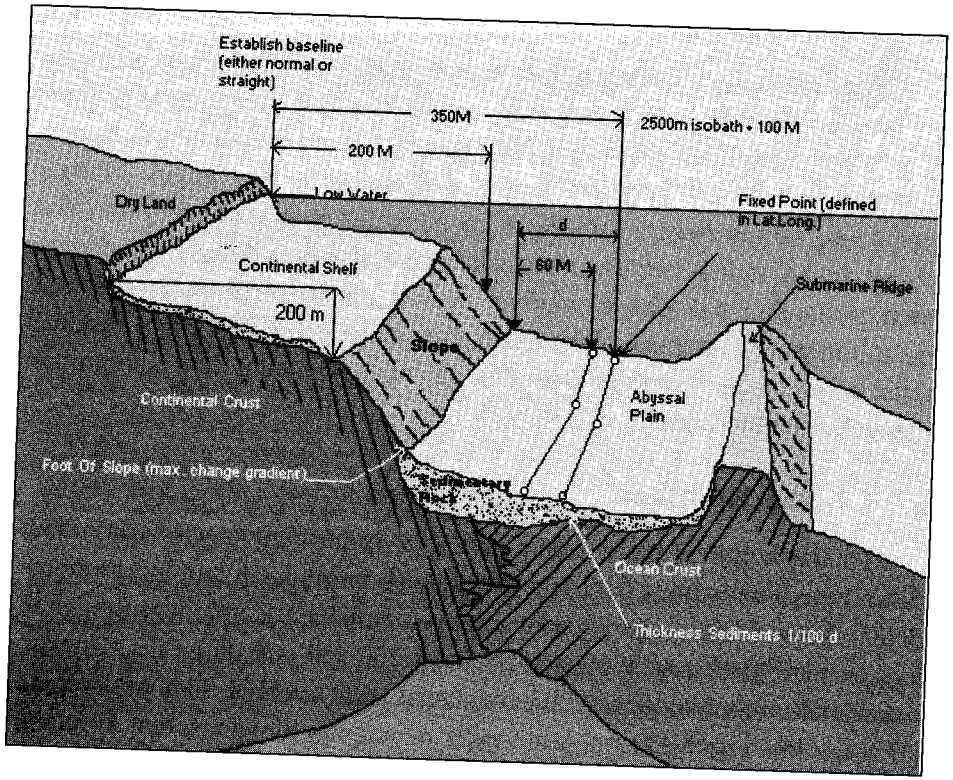
Landas kontinen suatu negara pantai meliputi suatu kawasan dasar laut dan tanah di bawahnya dari daerah di bawah permukaan laut yang terletak di luar laut teritorial, sepanjang kelanjutan alamiah daratan hingga pinggiran luar tepi kontinen atau hingga suatu jarak 200 mil laut dari garis pangkal, dalam hal ini tepi kontinen tidak mencapai jarak tersebut. Jika jarak tepian kontinen lebih dari 200 mil laut, maka penetapan pinggiran luar kontinen dilakukan dengan cara:

(i) Menghubungkan titik-titik tetap terluar dimana ketebalan batu endapan paling sedikit 1% dari jarak terdekat antara titik tersebut dan kaki lereng kontinen (titik perubahan maksimum); atau

(ii) Suatu garis lurus yang ditarik dari titik-titik tetap yang terletak tidak lebih dari 60 mil laut dari kaki lereng kontinen.

Namun demikian, garis batas terluar tidak boleh melebihi 350 mil laut atau 100 mil laut dari garis kedalaman (*isobath*) 2500 m, kecuali untuk elevasi dasar laut yang merupakan bagian alamiah tepian kontinen, seperti pelataran (*plateau*), tanjakan, puncak (*caps*), ketinggian yang datar (*bank*) dan puncak gunung yang bulat (*spurs*). Negara pantai harus menetapkan batas terluar landas kontinennya yang melebihi 200 mil laut dengan cara menarik garis-garis lurus yang panjangnya tidak melebihi 60 mil laut, dengan menghubungkan titik-titik tetap yang mempunyai koordinat geografis.

Gambar 6.3 memperlihatkan penentuan batas landas kontinen berdasarkan konvensi Hukum Laut PBB tahun 1982.



Gambar 6.3 **Batas landas kontinen (IHO, 1993)**

Negara pantai mempunyai hak berdaulat atas sumber kekayaan alam (hak eksklusif) untuk tujuan eksplorasi dan eksploitasi. Jika negara pantai tidak memanfaatkan haknya, tidak seorangpun dapat melakukan kegiatan eksplorasi dan eksploitasi tanpa persetujuan tegas dari negara pantai yang berhak. Negara pantai juga berhak menetapkan persyaratan bagi pemasangan pipa dan kabel bawah laut negara lain di atas landas kontinennya, dengan maksud untuk pencegahan, pengurangan, dan pengendalian pencemaran atau terganggunya kegiatan eksplorasi dan eksploitasi. Di samping itu, negara pantai mempunyai kewajiban untuk melakukan pembayaran atau sumbangan berupa barang melalui pihak berwenang bertalian dengan eksploitasi sumber kekayaan alam non-hayati landas kontinen di luar 200 mil laut.

f. Laut Lepas

Semua bagian dari laut yang tidak termasuk dalam zona ekonomi eksklusif, laut teritorial dan perairan pedalaman suatu negara atau perairan kepulauan suatu negara kepulauan merupakan kawasan laut lepas. Laut lepas terbuka untuk negara pantai atau negara tidak berpantai untuk melakukan kegiatan-kegiatan:

(1) Berlayar di bawah satu bendera negara,
(2) Penerbangan,
(3) Memasang pipa dan kabel bawah laut,
(4) Membangun pulau buatan dan instalasi lainnya,
(5) Menangkap ikan, dan
(6) Penelitian ilmiah.

Kebebasan ini dilaksanakan oleh semua negara dengan memperhatikan kepentingan negara lain dan ketentuan lainnya dalam konvensi. Laut lepas pada dasarnya memang dicadangkan untuk maksud damai.

C. PENETAPAN BATAS LAUT DI INDONESIA

Dalam kaitannya dengan penetapan batas-batas wilayah perairan seperti yang diuraikan di atas, maka kegiatan yang harus dilakukan meliputi:

(1) Penggambaran garis-garis pangkal.
(2) Penentuan wilayah laut secara teliti.
(3) Penentuan batas-batas lepas pantai (Laut Teritorial, Zona Tambahan, Zona Ekonomi Eksklusif dan Landas Kontinen).
(4) Pendefinisian batas-batas ekuidistan (sama jarak) untuk penetapan batas laut dengan negara tetangga, jika batas yang normal tidak dapat diterapkan.

Semua kegiatan di atas banyak terkait dengan aspek teknis, terutama aspek geodetik dan hidrografik yang dalam implementasinya tidak lain berupa kegiatan survei dan pemetaan laut. Produk akhir dari kegiatan penetapan batas seperti yang disyaratkan dalam UNCLOS 1982 berupa peta laut atau dalam bentuk daftar koordinat geodetik (geografis) dari titik-titik batas.

Konsep yang ada dalam UNCLOS 1982 sebenarnya dapat diterapkan secara langsung untuk kegiatan penetapan batas laut untuk daerah propinsi dan kabupaten atau kota di Indonesia. Secara praktis, memang diperlukan beberapa penyesuaian, terutama yang berkaitan dengan beberapa hal, yaitu

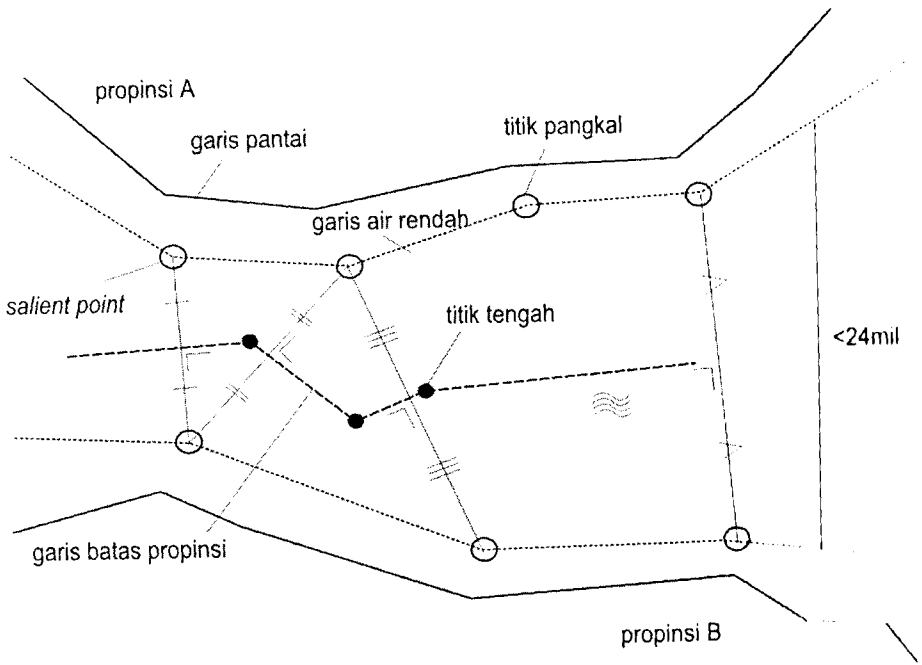
- Pendefinisian garis pantai seperti yang dimaksud dalam UU No. 22 Tahun 1999, harus jelas mengacu pada kedudukan muka laut; apakah muka laut rendah (seperti dalam UNCLOS 1982), muka laut rata-rata (seperti dalam peta rupa bumi), atau muka laut tinggi (seperti dalam peta-peta hidrografi).
- Jenis garis pantai yang akan digunakan; apakah garis pantai lurus (yang menghubungkan dua titik terluar ke arah laut yang terletak pada garis pantai), garis pantai normal (yang mengikuti bentuk topografis pantai), atau kombinasi keduanya (seperti dalam UNCLOS 1982).
- Jika garis pantai lurus dapat digunakan, maka harus ada batasan berapa panjang maksimum dari garis pantai lurus tersebut (terutama garis pantai lurus untuk menutupi sungai, teluk, dan pelabuhan, serta pulau-pulau).
- Harus ada ketentuan yang bersifat pengecualian dari yang berlaku umum, (terutama bagi wilayah-wilayah laut yang secara historis merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari suatu wilayah propinsi tertentu), sebagai contoh Kepulauan Seribu.
- Batas terluar wilayah laut propinsi yang dapat mencapai 12 mil laut tidak boleh melebihi batas terluar dari batas Laut Teritorial yang sudah ditetapkan sebelumnya dalam rangka implementasi UNCLOS 1982.

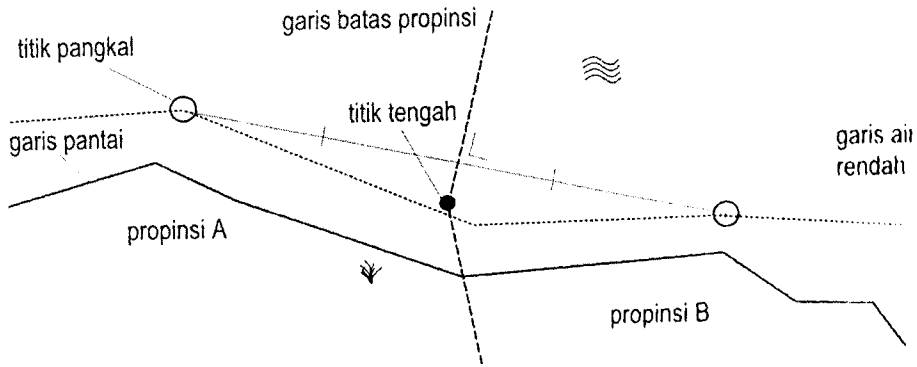
Konsep penetapan batas yang dikemukakan di atas selanjutnya diterapkan untuk wilayah laut yang terdiri dari:

(1) Wilayah laut propinsi, meliputi wilayah laut yang dibatasi oleh garis pantai hingga batas terluar sejauh 12 mil laut dari garis pantai. Batas terluar 12 mil laut dapat berkurang apabila lebar laut yang berbatasan langsung dengan propinsi tersebut kurang dari 24 mil. Dalam kasus ini, maka penetapan batas terluar menggunakan prinsip sama jarak terhadap garis pantai propinsi lain. Jika batas terluar langsung berbatasan dengan negara lain, maka batas terluar yang digunakan tidak boleh melebihi batas yang sudah ditetapkan antara negara Indonesia dengan negara tetangga. Sedangkan batas laut dengan propinsi yang bersebelahan juga ditetapkan menggunakan prinsip sama jarak (Gambar 6.4).

(2) Wilayah laut kabupaten atau kota atau kota, terdiri dari sepertiga wilayah laut propinsi. Batas laut dengan kabupaten atau kota yang bersebelahan juga dilakukan dengan prinsip sama jarak (Gambar 6.5).

Dalam konteks batas antar dua negara pantai bertetangga yang berhadapan atau bersebelahan, konsep di atas juga dapat diterapkan.





Gambar 6.5 **Penarikan garis batas antar propinsi yang bersebelahan**

D. IMPLEMENTASI PENETAPAN BATAS LAUT DAERAH DI LAPANGAN

a. Penentuan Lokasi Daerah Survei

Agar penetapan batas wilayah laut antar propinsi di Indonesia dapat dilakukan, maka diperlukan survei daratan dan lautan, yang terdiri dari:

(1) Survei geodetik dan topografik

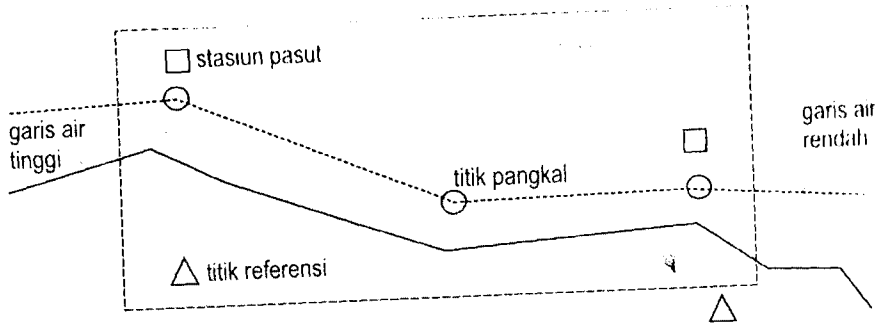
(2) Pengamatan pasut

(3) Survei batimetrik

Survei geodetik dan topografik diperlukan dalam rangka penentuan garis pantai (sebagai acuan penarikan batas) dan titik-titik pangkal (yang terletak pada garis pantai), sebagai dasar untuk meng-klaim wilayah laut sejauh 12 mil laut dari garis pantai ke arah laut atau perairan kepulauan, sesuai ketentuan pasal 3 UU No. 22 tahun 1999. Survei ini juga diperlukan untuk penentuan koordinat geodetik titik-titik referensi yang di lapangan diwakili secara fisis dalam bentuk BM (*bench mark*).

Untuk menentukan lokasi daerah survei bagi penempatan titik-titik referensi, diperlukan peta-peta seperti Peta Laut, Peta Rupa Bumi, Peta Lingkungan Pantai, Peta Lingkungan Laut Nasional atau peta lainnya yang relevan. Informasi utama dari peta tersebut yang diperlukan bagi kegiatan penetapan batas laut, adalah garis pantai yang tergambar dengan baik atau telah diperlihatkan secara jelas pada peta. Berdasarkan bentuk garis pantai, selanjutnya dapat diperkirakan letak titik-titik dasar (sesuai dengan pengertian yang telah ditetapkan).

Lokasi titik-titik referensi sebaiknya ditempatkan di sekitar pantai dan berada di dekat titik-titik dasar, pada tempat yang aman dan tidak tergenang air pasang, agar dapat bertahan lama. Secara visual diupayakan posisi titik-titik referensi ini terletak sedemikian rupa sehingga masih dapat menjangkau posisi titik-titik dasar dengan alat ukur optis. Survei batimetri dan pengukuran topografi pantai, idealnya dilakukan di sepanjang pantai di dekat lokasi titik referensi dengan cakupan ke arah laut sejauh garis pasang surut. Akibatnya, panjang jalur survei ke arah laut akan bervariasi, tergantung pada kelandaian topografi dasar laut dan besarnya tunggang pasut. Semakin landai dan semakin besar tunggang air, maka semakin panjang jalur survei yang diperlukan. Pengamatan pasut sebaiknya dilakukan pada dua lokasi yang mewakili daerah survei batimetri. Lokasi daerah survei, secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 6.6.



Gambar 6.6 **Daerah survei**

Survei di atas diperlukan apabila garis pantai belum diketahui. Jika telah tersedia peta dasar (Peta Rupa Bumi atau Peta Navigasi Laut) skala besar, maka garis pantai dapat juga ditentukan langsung dari garis pantai yang ada pada peta tersebut dengan asumsi bahwa garis pantai pasut rendah berimpit dengan garis pantai yang ada dalam peta.

b. Pemasangan Pilar Titik Referensi

Spesifikasi pilar titik referensi diperlukan agar terjadi keseragaman dalam pembuatan pilar dan untuk kemudahan identifikasi di lapangan. Spesifikasi yang diusulkan adalah:

- Titik referensi merupakan titik yang digunakan sebagai acuan untuk menetapkan titik-titik pangkal di lapangan.
- Titik referensi diwakili oleh sebuah pilar beton berangka besi dengan bentuk dan ukuran seperti terlihat pada Lampiran II dan dicat warna biru laut, serta ditanam pada tanah yang cukup keras dengan bagian yang ditanam 70 cm, sedangkan yang di atas tanah 30 cm.
- Pada bagian tengah atas pilar dipasang sebuah kuningan berbentuk lempengan bulat berdiameter 10 cm dengan tulisan Kode dan Nomor Titik Referensi, sedangkan pada bagian samping pilar ke arah laut diberi marmer berukuran 20x16cm^2 dengan tulisan Titik Referensi Batas Laut Propinsi.

Lokasi pilar dipasang sedemikian rupa sehingga relatif aman dari jangkauan air laut saat pasang, dan jika memungkinkan ditempatkan di halaman kantor pemerintahan daerah.

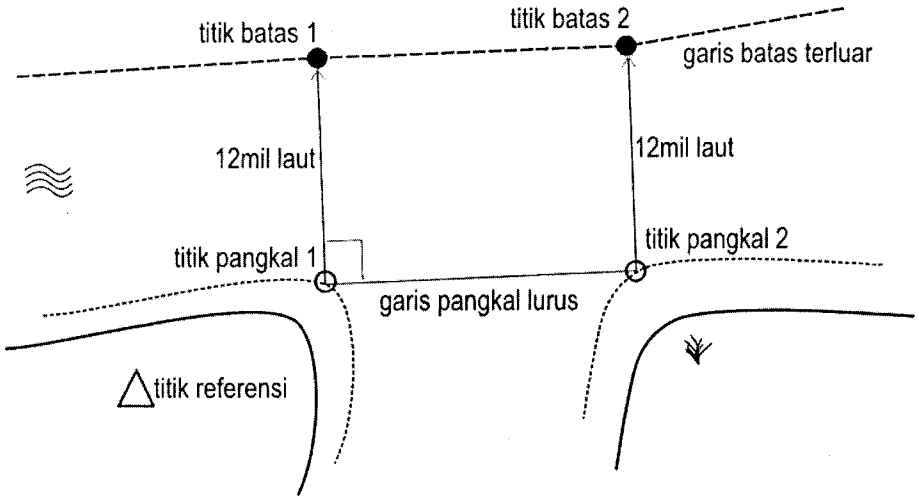
c. Penggambaran dan Penentuan Koordinat Titik Batas

Berdasarkan berbagai kemungkinan letak titik-titik pangkal, maka suatu titik pangkal dapat:

- Terletak pada kontur kedalaman nol (garis air rendah sepanjang pantai).
- Terletak pada bentukan alamiah (misalnya: batu, karang, dan gosong) yang tampak di permukaan laut pada waktu air surut.
- Terletak di tepi pantai yang terjal/curam, sehingga tidak mungkin diperoleh kontur kedalaman nol, akibatnya posisi titik pangkal ditempatkan pada tepi tebing.

Apabila koordinat titik-titik dasar telah tergambar, maka letak koordinat titik batas wilayah laut propinsi dan kabupaten atau kota dapat ditentukan. Posisi titik dan garis batas terluar sejauh 12 mil laut dapat ditentukan secara grafis atau digambarkan pada lembar lukis teliti skala 1:25000 berdasarkan posisi titik-titik pangkal tersebut (Gambar 6.7).

Apabila dalam konteks negara pantai, informasi mengenai batas harus diserahkan kepada Sekjen PBB, maka dalam konteks batas daerah, Menteri Dalam Negeri Indonesia yang berwenang untuk mengesahkan batas laut antar daerah (Propinsi atau Kabupaten/Kota).



Gambar 6.7 **Penentuan titik batas wilayah laut dari garis pangkal lurus**

Referensi

International Hydrographic Organization - IHO (1993). *Technical Aspects of the Law of the Sea. Special Publication Number 51. 3rd Edition.* International Hydrographic Bureau - IHB, Monaco.

Pustaka

Djunarsjah, E. (2003). Aspek Teknik Hukum Laut. Diktat Kuliah. Penerbit ITB. Bandung, Indonesia.

Lampiran A

Transformasi Koordinat

Berikut ini adalah rumus yang digunakan untuk melakukan transformasi dari sistem koordinat kartesian ke sistem koordinat geodetik.

$$\varphi = a\tan\left(\frac{Z + e'^2.b\sin^3\theta}{p - e^2 a\cos^3\theta}\right)$$
$$\lambda = a\tan 2(Y, X)$$
$$h = \frac{p}{\cos(\varphi)} - N(\varphi) \qquad \text{(A.1)}$$

dengan φ, λ, h = lintang, bujur dan tinggi di atas elipsoid dan X, Y, Z koordinat kartesian ECEF serta parameter-parameter lainnya:

$$p = \sqrt{X^2 + Y^2}$$
$$\theta = a\tan\left(\frac{Za}{pb}\right)$$
$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}$$
$$N(\varphi) = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi}}$$

dengan a = setengah sumbu panjang elipsoid referensi, b = setengah sumbu pendek elipsoid, f = (a–b)/b dan $e^2 = 2f - f$.

Rumus yang digunakan untuk melakukan transformasi dari sistem koordinat geodetik ke sistem koordinat kartesian adalah:

$$\begin{aligned} X &= (N+h)\cos\varphi\cos\lambda \\ Y &= (N+h)\cos\varphi\sin\lambda \\ Z &= \left(N\left(1-e^2\right)+h\right)\sin\varphi \end{aligned} \qquad \text{(A.2)}$$

Berikut ini ditunjukkan penggunaan rumus baku Molodensky untuk konversi posisi suatu titik, misalnya, pada datum Bessel 1841 ke WGS-84, jika diketahui koordinat geodetik pada datum Bessel 1841 φ_B, λ_B dan h_B serta parameter-parameter elipsoid a_B, f_B, $e_B^2 = 2f_B - f_B$, a_{WGS84} dan f_{WGS84}. Parameter-parameter *datum shift* Bessel 1841 ke WGS-84 diketahui δX, δY dan δZ.

Pergeseran lintang, bujur dan tinggi di atas elipsoid referensi adalah:

$$\delta\varphi = \frac{1}{R_m + h_B}\left[\begin{array}{l}(-\delta X\sin\varphi_B\cos\lambda_B - \delta Y\sin\varphi_B\sin\lambda_B) \\ +\delta Z\cos\varphi_B + \delta a\dfrac{R_n e_B^2\sin\varphi_B\cos\varphi_B}{a_B}\end{array}\right]$$
$$+\delta f\left(\frac{R_m}{(1-f_B)} + R_n - (1-f_B)\right)\sin\varphi_B\cos\varphi_B$$

$$\delta\lambda = \frac{-\delta X\sin\lambda_B + \delta Y\cos\lambda_B}{(R_n + h_B)\cos\varphi_B} \qquad \text{(A.3)}$$

$$\delta h = \delta X\cos\varphi_B\cos\lambda_B + \delta Y\cos\varphi_B\sin\lambda_B + \delta Z\sin\varphi_B - \delta a\frac{a_B}{R_n}$$
$$+\delta f(1-f_B)R_n\sin\varphi_B\sin\varphi_B$$

dengan $1-f_B = b_B/a_B$ dan pergeseran parameter-parameter elipsoid:

$\delta a = a_{WGS84} - a_B$

$\delta f = f_{WGS84} - f_B$

$$R_n = \frac{a_B}{\sqrt{1-e_B^2\sin(\varphi_B)^2}}$$

$$R_m = a_B - \frac{1-a_B}{\left(1-e_B^2-\sin(\varphi_B)^2\right)^{3/2}}$$

Konversi ke datum WGS-84 diperoleh dengan:

$$\begin{aligned} \varphi_{WGS84} &= \varphi_B + \delta\varphi \\ \lambda_{WGS84} &= \lambda_B + \delta\lambda \\ h_{WGS84} &= h_B + \delta h \end{aligned} \qquad \text{(A.4)}$$

Lampiran B

Model Matematika Penentuan Posisi

Hubungan fungsional antara pengamatan (besaran yang diukur) dengan parameter (besaran yang akan ditentukan nilainya) dinyatakan dalam model matematika penentuan posisi. Besaran-besaran yang diukur adalah arah, sudut, jarak dan selisih jarak.

Semua model matematika yang telah dilinierkan dapat ditulis dalam bentuk umum:

$$W+AX-V = 0 \qquad \text{(B.1)}$$

dengan W = nilai pendekatan yang dihitung berdasarkan koordinat pendekatan minus nilai yang diukur (misalnya, $\alpha^o_{iu}-\alpha^u_{iu}$), A = matriks desain, X = parameter yang dicari, yaitu dx_u, dy_u atau $d\varphi_u$, $d\lambda_u$ dan V = residu pengamatan. Persamaan 2.1 diselesaikan dengan metode kuadrat terkecil:

$$X=-(A^TpA)^{-1}(A^TpW) \qquad \text{(B.2)}$$

dengan p = matriks berat pengamatan. Selanjutnya koordinat definitif titik u dapat dihitung dengan:

$$\hat{X} = X^0 + X \qquad \text{(B.3)}$$

dengan $\hat{X}$ = parameter, X^0 = parameter pendekatan dan X = koreksi pada parameter pendekatan. Persamaan 2.2 dan 2.3 diselesaikan secara iteratif. Parameter pendekatan dapat ditentukan secara grafis, berdasarkan data ukuran atau sembarang.

Pengamatan Arah

Hubungan antara arah suatu garis dengan titik-titik yang diketahui dan akan ditentukan nilai koordinatnya pada sistem koordinat kartesian dapat dinyatakan dengan:

$$\tan\alpha_{iu} = \frac{x_u - x_i}{y_u - y_i} \qquad \text{(B.4)}$$

atau dapat ditulis sebagai fungsi yang tidak linier:

$$F_{iu} = \alpha(x_i, y_i, x_u, y_u) - \alpha_{iu} = \tan^{-1}\left(\frac{x_u - x_i}{y_u - y_i}\right) - \alpha \qquad \text{(B.5)}$$

dengan α_{iu} = arah iu, (x_u, y_u) = koordinat titik u sebagai titik yang akan ditentukan koordinatnya, (x_i, y_i) = koordinat titik i sebagai titik kontrol yang diketahui koordinatnya. Persamaan B.5 dapat dilinierkan dengan uraian menurut deret Taylor:

$$F_u = F^0_{iu} - dF_u \qquad \text{(B.6)}$$

dengan

$$dF^0_{iu} = \alpha(x_i, y_i, x^0_u, y^0_u) - \alpha^u_{iu},$$

$$dF_{iu} = \left.\frac{\partial F}{\partial X}\right|_{X^0}^{X-X^0} + \left.\frac{\partial F}{\partial L}\right|_{L^0}^{L-L^u},$$

$$X = (x_i, y_i, x_u, y_u),$$

$X^0 = (x_i, y_i, x^0_u, y^0_u)$, (x^0_u, y^0_u) = koordinat pendekatan titik u, $L = \alpha_{iu}$ = arah iu definitif dan $L^0 = \alpha^0_{iu}$ = arah iu ukuran. Jika $\partial F/\partial X = -1$ dan misalkan $(L - L^u)$ adalah harga residu $(V\alpha_{iu})$, maka Persamaaan B.5 dapat ditulis:

$$F_{iu} = \alpha(x_i, y_i, x^0_u, y^0_u) - \alpha^u_{iu} + d\alpha(x_i, y_i, x_u, y_u) - V\alpha_{iu} = 0 \qquad \text{(B.7)}$$

dengan

$$d\alpha(x_i, y_i, x_u, y_u) = \frac{\partial\alpha}{\partial x_i}dx_i + \frac{\partial\alpha}{\partial x_i}dy_i + \frac{\partial\alpha}{\partial x_u},$$

maka Persamaan B.7 menjadi

$$F_{iu} = \alpha^0_{iu} - \alpha^u_{iu} + \rho'' \frac{x^0_u - x_i}{d^{0\,2}_{iu}} dy_i - \rho'' \frac{y^0_u - y_i}{d^{0\,2}_{iu}} dx_i$$
$$- \rho'' \frac{x^0_u - x_i}{d^{0\,2}_{iu}} dy_u - \rho'' \frac{y^0_u - y_i}{d^{0\,2}_{iu}} dx_u - V\alpha_{iu} = 0 \qquad \text{(B.8)}$$

dengan $d^0_{iu} = [(x_i - x^0_u)^2 + (y_i - y^0_u)^2]^{1/2}$ = jarak pendekatan titik iu. Dengan cara yang sama dapat juga dibentuk model matematika untuk pengamatan azimut, jika digunakan sistem koordinat geodetik, yaitu:

$$F_{iu} = \alpha^0_{iu} - \alpha^u_{iu} + \frac{M_i \sin\alpha^0_{iu}}{d^0_{iu}} d\varphi_i + \frac{N^0_u \cos\varphi^0_u \cos\alpha^0_{iu}}{d^0_{iu}} d\lambda_i$$
$$+ \frac{M_u \sin\alpha^0_{iu}}{d^0_{iu}} d\varphi_u + \frac{N^0_u \cos\varphi^0_u \cos\alpha^0_{iu}}{d^0_{iu}} d\lambda_u - V\alpha_{iu} = 0 \qquad \text{(B.9)}$$

dengan M_i dan M_u = jari-jari kelengkungan meridian yang melalui titik i dan titik u, N_i dan N_u = jari-jari kelengkungan normal pada bidang yang tegak lurus bidang meridian i dan meridian u, (φ_i, λ_i) = koordinat geodetik titik i, (φ_u, λ_u) = koordinat geodetik titik u, φ = bujur dan λ = lintang.

Pengamatan Sudut

Pada dasarnya, sudut adalah selisih dua arah sehingga dapat ditulis:

$$\beta_{iuj} = \alpha_{ui} - \alpha_{uj} \qquad \text{(B.10)}$$

sehingga model matematika pengamatan sudut merupakan selisih model matematika arah F_{iu} dan F_{ju}. Pada sistem koordinat kartesian, maka model matematika pengamatan sudut adalah:

$$F_{iuj} = \alpha^0_{iuj} - \alpha^u_{iuj} - \rho'' \left(\begin{array}{l} \dfrac{x^0_u - x_i}{d^{0\,2}_{iu}} dy_i - \dfrac{y^0_u - y_i}{d^{0\,2}_{iu}} dx_i - \dfrac{x^0_u - x_j}{d^{0\,2}_{ju}} dy_j \\ - \dfrac{y^0_u - y_i}{d^{0\,2}_{ju}} dx_j - \left(\dfrac{x^0_u - x_j}{d^{0\,2}_{ju}} - \dfrac{x^0_u - x_i}{d^{0\,2}_{iu}} \right) dy_u \\ - \left(\dfrac{y^0_u - y_j}{d^{0\,2}_{ju}} - \dfrac{y^0_u - y_i}{d^{0\,2}_{iu}} \right) dx_u \end{array} \right) - V\beta_{iuj} = 0 \quad \text{(B.11)}$$

Jika sistem koordinat geodetik yang digunakan, maka model matematika pengamatan sudut adalah:

$$\begin{aligned} F_{iuj} = {} & \beta^0_{iu} - \beta^u_{iu} - \frac{M_i \sin\alpha^0_{iu}}{d^0_{iu}} d\varphi_i + \frac{N^0_u \cos\varphi^0_u \cos\alpha^0_{ui}}{d^0_{iu}} d\lambda_i \\ & + \frac{M_j \sin\alpha^0_{ju}}{d^0_{ju}} d\varphi_j - \frac{N^0_u \cos\varphi^0_u \cos\alpha^0_{uj}}{d^0_{ju}} d\lambda_j \\ & + M_u \left(\frac{\sin\alpha^0_{uj}}{d^0_{ju}} - \frac{\sin\alpha^0_{ui}}{d^0_{iu}} \right) d\varphi_u - N^0_u \left(\begin{array}{l} \dfrac{\cos\varphi^0_u \cos\alpha^0_{uj}}{d^0_{ju}} \\ - \dfrac{\cos\varphi^0_u \cos\alpha^0_{ui}}{d^0_{iu}} \end{array} \right) d\lambda_u \\ & - V\beta_{iuj} = 0 \end{aligned} \quad \text{(B.12)}$$

dengan d^0_{iu} dan d^0_{ju} = jarak pendekatan *iu* dan *ju* yang dihitung dari koordinat pendekatan titik *u*, β^0_{iuj} = harga sudut yang dihitung dari koordinat pendekatan titik *u* dan β^u_{iuj} = harga sudut hasil pengukuran.

Pengamatan Jarak

Hubungan antara pengamatan jarak dengan koordinat titik yang akan ditentukan dalam sistem koordinat bidang datar adalah sebagai berikut:

$$d(x_i, y_i, x_u, y_u) = [(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2\,]^{1/2} \quad \text{(B.13)}$$

atau dapat ditulis dalam bentuk fungsi sebagai berikut:

$$F_{iu} = d(x_i, y_i, x_u, y_u) - d_{iu} = 0 \quad \text{(B.14)}$$

dengan d_{iu} = harga jarak definitif dan $d(x_i, y_i, x_u, y_u)$ = harga jarak yang dihitung dari Persamaan B.13. Persamaan B.14 dilinierkan menggunakan deret Taylor dan dengan cara yang sama seperti model matematika untuk pengamatan arah diperoleh:

$$\begin{aligned} F_{iu} = {} & \left(d^0_{iu} - d^u_{iu}\right) - \frac{x^0_u - x_i}{d^0_{iu}} dx_i - \frac{y^0_u - y_i}{d^0_{iu}} dy_i \\ & - \frac{x^0_u - x_i}{d^0_{iu}} dx_u - \frac{y^0_u - y_i}{d^0_{iu}} dy_u - V d_{iu} = 0 \end{aligned} \quad \text{(B.15)}$$

Dalam sistem koordinat geodetik model matematika untuk pengamatan jarak adalah:

$$\begin{aligned} F_{iu} = {} & \left(d^0_{iu} - d^u_{iu}\right) - \frac{M_i \cos\alpha^0_{iu}}{\rho''} d\varphi''_i + \frac{N^0_u \cos\varphi^0_u \sin\alpha^0_{iu}}{\rho''} d\lambda''_i \\ & - \frac{M_u \cos\alpha^0_{ui}}{\rho''} d\varphi''_u + \frac{N^0_u \cos\varphi^0_u \sin\alpha^0_{ui}}{\rho''} d\lambda''_u - V d_{iu} = 0 \end{aligned} \quad \text{(B.16)}$$

Pengamatan Selisih Jarak

Model matematika selisih jarak diturunkan dari model matematika pengamatan jarak:

$$d_{iju} = d_{ju} - d_{iu} \quad \text{(B.17)}$$

Model matematika pengamatan selisih jarak pada sistem koordinat kartesian adalah:

$$F_{iju} = \left(d^0_{ju} - d^0_{iu}\right) - d^u_{iju} + \frac{x^0_u - x_i}{d^0_{iu}} dx_i + \frac{y^0_u - y_i}{d^0_{iu}} dy_i - \frac{x^0_u - x_j}{d^0_{ju}} dx_j$$
$$- \frac{y^0_u - y_j}{d^0_{ju}} dy_j + \left(\frac{x^0_u - x_j}{d^0_{ju}} - \frac{x^0_u - x_i}{d^0_{iu}} \right) dx_u$$
$$+ \left(\frac{y^0_u - y_j}{d^0_{ju}} - \frac{y^0_u - y_i}{d^0_{iu}} \right) dy_u - V d_{iju} = 0 \qquad \text{(B.18)}$$

Pada sistem koordinat geodetik, model matematika pengamatan selisih jarak adalah:

$$F_{iju} = \left(d^0_{ju} - d^0_{iu}\right) - d^0_{iju} - \frac{M_i \cos\alpha^0_{iu}}{\rho''} d\varphi''_i - \frac{N^0_u \cos\varphi^0_u \sin\alpha^0_{ui}}{\rho''} d\lambda''_i$$
$$- \frac{M_i \cos\alpha^0_{ju}}{\rho''} d\varphi''_j - \left(\frac{M_i \cos\alpha^0_{ju}}{\rho''} - \frac{M_i \cos\alpha^0_{iu}}{\rho''} \right) d\varphi''_u \qquad \text{(B.19)}$$
$$- \left(\frac{N^0_u \cos\varphi^0_u \sin\alpha^0_{iu}}{\rho''} - \frac{N^0_u \cos\varphi^0_u \sin\alpha^0_{ui}}{\rho''} \right) d\lambda''_u - V d_{iju} = 0$$

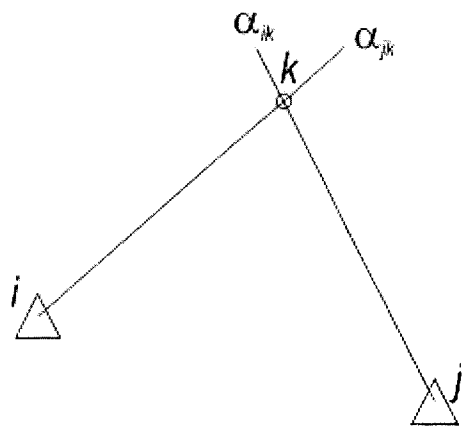
dengan d^0_{ju}, d^0_{iu}, α^0_{ju}, α^0_{iu} dihitung dari (φ_i, λ_i), (φ_j, λ_j) dan $(\varphi^0_u, \lambda^0_u)$.

Lampiran C

Segiempat dan Elips Kesalahan

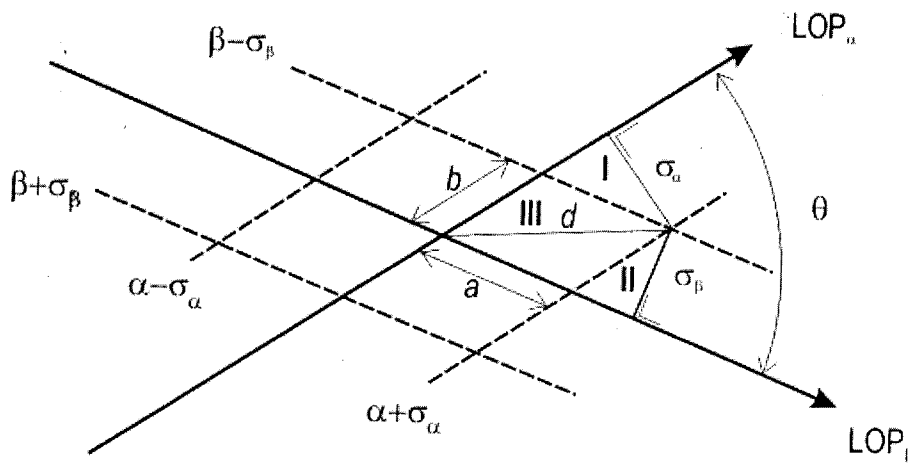
Pendekatan Trigonometrik dan Segiempat Kesalahan

Gambar C.1 memperlihatkan penentuan posisi *k* menggunakan kombinasi LOP garis lurus dengan pengamatan arah di titik *i* dan titik *j*. Jika pengamatan ke arah *k* dari *i* dan dari *j* mengandung kesalahan ($\alpha_{ik} \pm \sigma_{ik}$ dan $\alpha_{jk} \pm \sigma_{jk}$), maka *k* akan berada pada bidang yang dibatasi garis-garis kesalahan pengamatan *ik* dan *jk*. Bidang itu disebut sebagai segiempat kesalahan yang merupakan visualisasi geometrik ketelitian penentuan posisi *k*. Gambar C.2 memperlihatkan segiempat kesalahan yang terbentuk dari pengamatan arah-arah dari kombinasi LOP_α dan LOP_β.



Gambar C.1 Penentuan posisi titik *k* dari *i* dan *j* dengan pengamatan arah-arah *ik* dan *jk*

Pada potongan garis yang sangat kecil, garis arah LOP_α dapat dianggap sejajar dengan $\alpha \pm \sigma_\alpha$ dan LOP_β sejajar dengan $\beta \pm \sigma_\beta$, sehingga akan diperoleh dua segitiga siku-siku yang dibentuk oleh sisi-sisi *a* dan σ_α serta oleh sisi-sisi *b* dan σ_β. Panjang *d*, yang merupakan ukuran keragu-raguan penentuan posisi *k*, berbanding terbalik ketelitian penentuan posisi *k*. Artinya, semakin panjang *d* semakin luas pula segiempat kesalahan yang terbentuk atau semakin rendah pula *confidence region* posisi *k*. Selain *d*, θ juga merupakan parameter segiempat kesalahan dengan pendekatan trigonometri.



Gambar C.2 Segiempat kesalahan dari pengamatan LOP_α dan LOP_β

Parameter segiempat kesalahan *d* dan θ diperoleh dengan tahapan yang dijelaskan berikut ini. Dari segitiga I diperoleh:

$$a = \frac{\sigma_\alpha}{\sin\theta} \qquad \text{(C.1)}$$

Dari segitiga II diperoleh:

$$b = \frac{\sigma_\beta}{\sin\theta} \qquad \text{(C.2)}$$

Jika θ adalah sudut yang dapat arah-arah LOP_α dan LOP_β maka besarnya sudut yang berhadapan dengan *d* pada segitiga III adalah $(180-\theta)$. Dengan rumus cosinus dari segitiga III diperoleh:

$$d^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos(180-\theta) \qquad \text{(C.3)}$$

karena $\cos(180-\theta) = -\cos\theta$, maka Persamaan C.3 dapat ditulis kembali sebagai berikut:

$$d^2 = a^2 + b^2 + 2ab\cos\theta \qquad \text{(C.4)}$$

Dari Persamaan-persamaan C.2 dan C.3 diperoleh:

$$a = \sigma_\alpha \csc\theta \qquad \text{(C.5)}$$

$$b = \sigma_\beta \csc\theta \qquad \text{(C.6)}$$

Substitusi Persamaan-persamaan C.5 dan C.6 ke Persamaan C.4 menghasilkan:

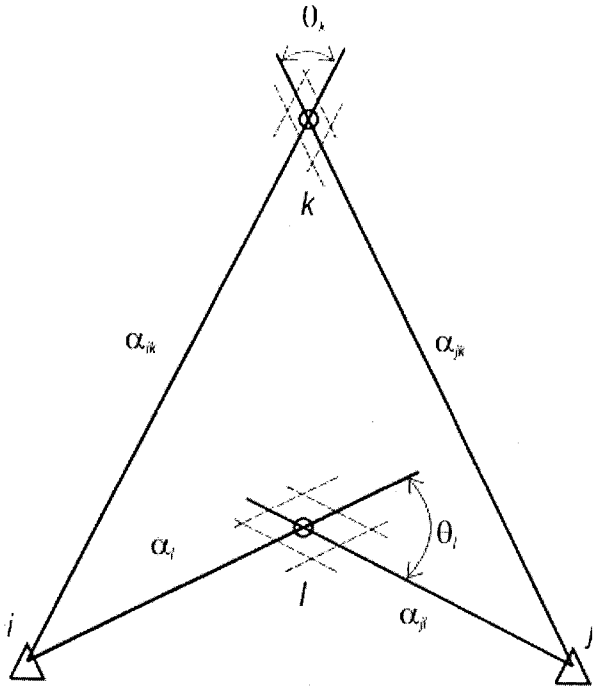
$$d = \csc\theta\sqrt{\left(\sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2 + 2\sigma_\alpha\sigma_\beta\cos\theta\right)} \qquad \text{(C.7)}$$

dengan $\sigma_\alpha = \sigma_{LOP\alpha}.S_\alpha$, $\sigma_\beta = \sigma_{LOP\beta}.S_\beta$, S_α = panjang LOP_α dan S_β = panjang LOP_β. Besarnya θ dinyatakan dengan persamaan:

$$\theta = \text{mod}\,[\alpha_{jk} - \alpha_{ik} + 360^\circ, 180^\circ] \qquad \text{(C.8)}$$

$$\theta = \min\,[\theta, 180^\circ - \theta] \qquad \text{(C.9)}$$

Gambar C.3 memperlihatkan segiempat kesalahan dalam penentuan posisi dengan kombinasi LOP garis lurus. Pada titik *k*, $\theta = 180^\circ - (\alpha_{jk} - \alpha_{iu} - 180^\circ)$, sedangkan pada titik *l*, $\theta = \alpha_{jl} - \alpha_{il} - 180^\circ$.



Gambar C.3 Segiempat kesalahan di *k* dan *l* menggunakan kombinasi LOP garis lurus dari *i* dan *j*

Pendekatan Analitik dan Elips Kesalahan

Hubungan antara pengamatan dengan parameter dinyatakan dengan model umum:

$$\hat{L} = f\left(\hat{X}\right) \qquad \text{(C.10)}$$

Jika u adalah besaran yang hendak ditentukan nilainya dan n adalah data pengukuran maka redundansi $r = n-u$. Jika L adalah pengamatan yang mengandung kesalahan dan $\hat{L}$ adalah pengamatan yang diangap benar maka hubungan antara ke dua pengamatan tersebut dinyatakan dengan:

$$v = L - \hat{L} \qquad \text{(C.11)}$$

dengan v sebagai koreksi atau residu. Prinsip kuadrat terkecil menyatakan:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n}\left(v_i^2\right)_{\min} \qquad \text{(C.12)}$$

Jika sebuah fungsi tak linier dinyatakan dengan $f(X)=0$, maka dengan uraian deret Taylor diperoleh linierisasi untuk persamaan tersebut sebagai berikut:

$$f(X)=f(X_0)+\frac{\partial f(X)}{\partial X}\Delta X+\frac{\partial f^2(X)}{\partial X^2}\Delta X^2+\ldots+\frac{\partial f^n(X)}{\partial X^n}\Delta X^n=0 \qquad \text{(C.13)}$$

dengan $n = \infty$. Jika sementara digunakan suku pertama dan ke dua saja dari Persamaan C.13 maka diperoleh linerisasi Persamaan C.11 sebagai:

$$L+v=f(X_0)+\frac{\partial f(X)}{\partial X}\Delta X=0 \qquad \text{(C.14)}$$

Suku-suku ke-3 dan selanjutnya akan ditemukan kembali secara iteratif. Jika X_0 adalah parameter pendekatan maka diperoleh L_0 sebagai fungsi dari X_0, yang dinyatakan dengan $L_0 = f(X_0)$, kemudian ΔX dinyatakan dengan matriks X dan turunan parsial pertama $f(X)$ terhadap X sebagai matriks A, maka persamaan C.14 dapat dituliskan kembali menjadi,

$$v = AX - F \qquad \text{(C.15)}$$

dengan $F = (L-L_0)$. A disebut sebagai matriks koefisien atau matriks desain, X disebut sebagai matriks parameter dan F disebut sebagai kesalahan penutup. Persamaan C.12 dituliskan kembali sebagai:

$$\Phi = v^{\mathrm{T}}v_{\min} \qquad \text{(C.16)}$$

Substitusi Persamaan C.15 ke Persamaan C.16 memberikan:

$$v^{\mathrm{T}}v = (A^{\mathrm{T}}X^{\mathrm{T}}-F^{\mathrm{T}})(AX-F) = A^{\mathrm{T}}AX^{\mathrm{T}}X-AXF^{\mathrm{T}}-A^{\mathrm{T}}X^{\mathrm{T}}F+F^{\mathrm{T}}F \qquad \text{(C.17)}$$

Minimasi persamaan C.17 diperoleh dengan turunan parsialnya terhadap X, yang memberikan:

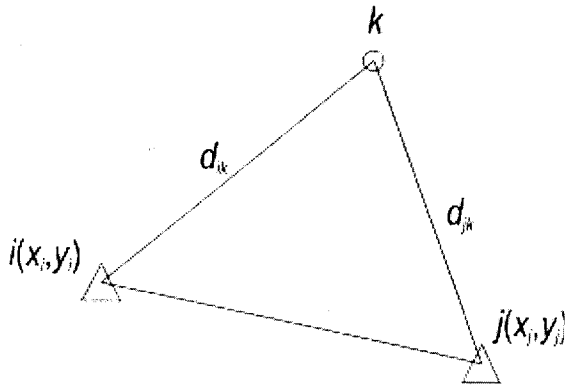
$$X = (A^{\mathrm{T}}A)^{-1}A^{\mathrm{T}}F \qquad \text{(C.18)}$$

Jika bobot pengamatan p tak seragam maka Persamaan C.18 termodifikasi menjadi:

$$X = (A^{\mathrm{T}}pA)^{-1}A^{\mathrm{T}}pF \qquad \text{(C.19)}$$

dengan bobot pengamatan $p = 1/\sigma_i^2$. σ_i^2 adalah variansi pengamatan yang diperoleh dari ketelitian alat.

Gambar C.4 memperlihatkan penentuan posisi *k* dengan kombinasi garis posisi lingkaran konsentrik dari *i* dan *j*.



Gambar C.4 Penentuan posisi titik *k* dari titik *i* dan titik *j* menggunakan kombinasi garis posisi lingkaran konsentrik

Model fungsional untuk masing-masing pengamatan jarak pada kasus seperti yang ditunjukkan pada Gambar C.4 dinyatakan dengan:

$$F_1 = \hat{d}_{ik} = \left((\hat{x}_k - \hat{x}_i)^2 + (\hat{y}_k - \hat{y}_i)^2\right)^{1/2}$$
$$F_2 = \hat{d}_{jk} = \left((\hat{x}_k - \hat{x}_j)^2 + (\hat{y}_k - \hat{y}_j)^2\right) \qquad \text{(C.20)}$$

Koreksi *v* pada pengamatan memberikan:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_k} & \frac{\partial F_1}{\partial y_k} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_k} & \frac{\partial F_2}{\partial y_k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \qquad \text{(C.21)}$$

Solusi aplikasi prinsip kuadrat terkecil dinotasi dengan:

$$X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \qquad \text{(C.22)}$$

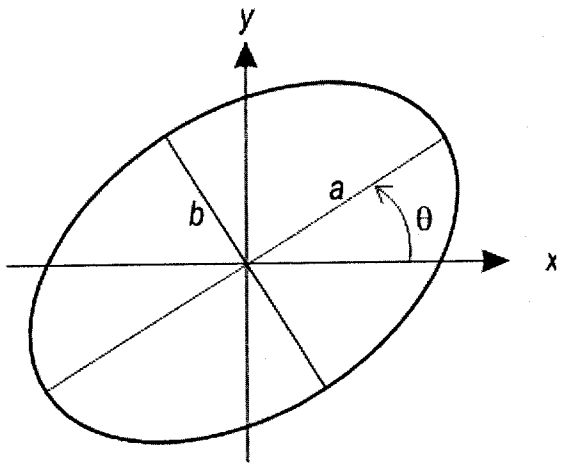
sehingga diperoleh koordinat titik *k* sebagai berikut:

$$x_k^1 = x_k^0 + \Delta x$$
$$x_y^1 = x_y^0 + \Delta y \qquad \text{(C.23)}$$

dengan x_k^0 = koordinat pendekatan untuk x_k dan y_k^0 = koordinat pendekatan untuk y_k. x_k^1 dan y_k^1 adalah koordinat titik *k* yang diperoleh dari iterasi pertama. Selanjutnya, koordinat tersebut dipakai sebagai koordinat *k* pendekatan untuk tahap iterasi berikutnya. Iterasi dilakukan terus hingga konvergen ((Δx, Δy)→0). Selanjutnya, disusun matriks variansi-kovariansi:

$$\sum X = \left(A^T pA\right)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \qquad \text{(C.24)}$$

Kualitas pengukuran yang diselesaikan dengan pendekatan analitik direpresentasikan dengan elips kesalahan (*error ellipse*) yang dibangun dari matriks variansi-kovariansi di atas. Ellips kesalahan ini menjelaskan kualitas pengukuran (atau pengamatan) secara visual. Gambar 2.41 adalah elips kesalahan yang diperoleh dari matriks variansi-kovariansi.



Gambar C.5 Elips kesalahan

Elips kesalahan dibangun dari unsur-unsur a (setengah sumbu panjang), b (setengah sumbu pendek) dan θ (rotasi sumbu utama elips terhadap sumbu probabilitas variabel x) yang diperoleh dengan:

$$a^2 = \frac{1}{2}\left(\sigma_x^2 + \sigma_y^2\right) + \sqrt{\frac{1}{4}\left(\sigma_x^2 - \sigma_y^2\right) + \sigma_{xy}^2} \qquad \text{(C.25)}$$

$$a^2 = \frac{1}{2}\left(\sigma_x^2 + \sigma_y^2\right) - \sqrt{\frac{1}{4}\left(\sigma_x^2 - \sigma_y^2\right) + \sigma_{xy}^2} \qquad \text{(C.26)}$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2} \qquad \text{(C.27)}$$

Tiga persamaan terakhir di atas diturunkan dari fungsi probabilistik variabel x dan y. Berdasarkan geometri elips kesalahan yang diperoleh, dapat dilakukan analisis untuk menentukan kualitas pengukuran. Elips kesalahan yang berbentuk lingkaran atau nyaris lingkaran ($a = b$) menunjukkan bahwa tidak ada korelasi antara x dan y. Kemiringan elips terhadap sumbu probabilistik x menunjukkan korelasi antara variabel x dan y. Jika elips kesalahan miring ke kiri, maka dikatakan bahwa x dan y berkorelasi positif, sebaliknya jika elips kesalahan miring ke kanan maka dikatakan bahwa x dan y berkorelasi negatif.

Lampiran D

Standar Ketelitian Survei Hidrografi

Sejalan dengan perkembangan teknologi baru dalam bidang survei dan pemetaan, terutama dalam kaitannya dengan semakin luasnya pemanfaatan teknologi satelit (misalnya: GPS) untuk keperluan penentuan posisi berketelitian tinggi, penggunaan *multibeam echosounder* atau *swath sonar* untuk pengukuran kedalaman dan penyelidikan dasar laut yang dapat mencakup 100% area survei dasar laut, serta kemajuan teknologi komputer untuk perkapalan, IHO menetapkan standar hidrografi baru yang dipublikasikan pada bulan April 1998. Standar survei hidrografi tersebut merupakan pedoman bagi negara-negara anggota IHO (termasuk Indonesia) dalam menyelenggarakan survei-survei hidrografi.

IHO Standards for Hydrographic Surveys dipublikasikan dalam bentuk *Special Publication Number 44* (SP-44 IHO) Edisi ke-4, menggantikan standar-standar survei hidrografi sebelumnya yang dipublikasikan berturut-turut tahun 1968 (Edisi ke-1), tahun 1982 (Edisi ke-2) dan tahun 1987 (Edisi ke-3). Ketiga standar survei hidrografi tersebut dimaksudkan untuk keperluan pembuatan peta navigasi laut yang digunakan sebagai pedoman untuk pelayaran. Penentuan skala survei didasarkan pada fase-fase navigasi laut yang dicerminkan oleh semakin besarnya skala peta untuk fase navigasi yang semakin dekat dengan pelabuhan. Skala survei selanjutnya dijadikan sebagai dasar untuk penentuan standar ketelitian penentuan posisi, mulai dari ketelitian posisi titik-titik kontrol pantai hingga ketelitian dari objek-objek yang akan dipetakan.

Pada edisi ke-4, penekanan diarahkan pada pengumpulan data untuk memenuhi berbagai kebutuhan pengguna. Standar ini tidak hanya dimaksudkan untuk keperluan pembuatan peta navigasi laut dan publikasi navigasi, tetapi juga untuk memenuhi keperluan seperti: pengumpulan data hidrografi bagi manajemen kawasan pesisir, pengawasan lingkungan, penetapan batas laut nasional (implementasi UU RI No. 22/1999) dan

internasional (implementasi UNCLOS 1982), pemodelan laut dan meteorologi, serta berbagai proyek kerekayasaan termasuk untuk penggalian sumber daya kelautan (IHO, 1998). SP-44 ini akan diperbaharui setiap lima tahun sekali (Monahan & Wells, 2000). Di samping perubahan dalam standar ketelitian penentuan posisi (berbasis satelit) maupun cakupan area survei dasar laut 100% (dengan *multibeam echosounder*), pemakaian SP-44 edisi terbaru ini disertai pemahaman tentang teori kesalahan, terutama pengertian tentang tingkat kepercayaan 95% yang berkaitan dengan ketelitian posisi dan kedalaman.

Klasifikasi Survei

Survei hidrografi dibagi berdasarkan berbagai persyaratan ketelitian untuk daerah yang disurvei (Tabel D.1). Standar ketelitian untuk masing-masing orde survei mencerminkan kepentingan ini dan secara efektif menggantikan standar penentuan posisi dan kerapatan data berdasarkan skala yang digunakan pada standar survei hidrografi edisi sebelumnya.

Tabel D.1 Klasifikasi survei

ORDE	Spesial	1	2	3
CONTOH DAERAH	Pelabuhan, tempat berlabuh, dan terusan kritis dengan hambatan sarat kapal minimum	Pelabuhan, pelabuhan mendekati terusan, jalur anjuran, dan daerah perairan dengan kedalaman hingga 100 m	Daerah yang tidak tercakup dalam Orde Spesial dan 1, atau daerah dengan kedalaman hingga 200 m	Daerah lepas pantai yang tidak tercakup dalam Orde Spesial, 1, dan 2

Survei hidrografi Orde Spesial mencakup daerah dengan karakteristik dasar laut yang berbahaya bagi keselamatan pelayaran. Orde survei ini membutuhkan ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan dengan standar ketelitian yang lama. Kantor atau dinas hidrografi negara anggota IHO bertanggung jawab untuk menentukan daerah mana saja yang harus disurvei dengan orde ini, termasuk kualitas data hasil survei. Survei Orde 1 dimaksudkan untuk daerah pelabuhan, perairan pantai dan pedalaman,

termasuk alur masuk pelabuhan tempat karakteristik dasar laut tidak begitu berbahaya (misalnya: pasir). Standar yang digunakan pada orde ini telah digunakan pada edisi-edisi SP-44 sebelumnya. Survei Orde 2 dapat dipakai untuk daerah dengan kedalaman kurang dari 200 m yang tidak tercakup oleh kriteria Orde Spesial atau Orde 1, sedangkan spesifikasi untuk Survei Orde 3 dapat dipakai untuk daerah dengan kedalaman lebih dari 200 m.

Penentuan Posisi

Pada SP-44 Edisi ke-3, disebutkan bahwa kedalaman ditentukan relatif terhadap titik kontrol sedemikian rupa sehingga kemungkinan 95% posisi kedalaman yang benar terletak dalam lingkaran dengan jari-jari 1.5 mm pada skala survei. Sebagai contoh, untuk skala survei 1:5,000 kedalaman terletak 0-7.5 m terhadap posisi sebenarnya dengan tingkat kepercayaan 95%. Dengan demikian, semua peralatan dan kemungkinan kesalahan yang berkaitan dengan penentuan posisi, serta kesalahan penggambaran titik-titik kedalaman (baik secara manual maupun dengan alat *plotter*), termasuk di dalamnya.

Dalam standar survei hidrografi yang baru (SP-44 Edisi ke-4), ditetapkan berbagai ketelitian posisi horisontal dengan tingkat kepercayaan yang sama, yaitu 95%, namun untuk empat macam orde survei. Salah satu konsep baru yang muncul adalah adanya standar ketelitian posisi yang bergantung pada faktor kedalaman (*depth-dependent*) yang dikaitkan dengan ketidakpastian posisi kedalaman dari sistem *multibeam sonar* dengan bertambahnya kedalaman (Tabel D.2).

Tabel D.2 Standar ketelitian posisi titik kedalaman

ORDE	Spesial	1	2	3
KETELITIAN HORISONTAL	2 m	5 m ± 5%*d*	20 m ± 5% *d*	150 m ± 5%*d*

d = kedalaman dalam m

Ketelitian relatif titik kontrol primer yang digunakan sebagai acuan untuk penentuan posisi titik kedalaman dalam standar survei hidrografi edisi baru adalah 1:100,000 (survei terestris). Jika penentuan posisi dilakukan dengan satelit (misalnya: GPS), maka kesalahan posisi titik kontrol yang dihasilkan tidak boleh melebihi 10 cm dengan tingkat kepercayaan 95%. Sedangkan

untuk titik kontrol sekunder yang digunakan untuk penentuan posisi lokal (tidak boleh digunakan untuk memperbanyak titik kontrol) mempunyai ketelitian relatif 1:10,000 jika penentuannya dilakukan secara teristris dan kesalahan posisi maksimal 50 cm jika menggunakan teknik penentuan posisi dengan satelit. Posisi horisontal alat-alat bantu navigasi dan fitur-fitur lainnya yang penting dalam survei hidrografi dalam standar baru, ditentukan dengan standar ketelitian yang diperlihatkan pada Tabel D.3.

Tabel D.3 Standar ketelitian posisi alat bantu navigasi dan fitur penting lainnya

	ORDE SPESIAL	ORDE 1	ORDE 2 & 3
Alat bantu navigasi tetap dan fitur penting bagi navigasi	2 m	2 m	5 m
Garis pantai alami	10 m	20 m	20 m
Posisi alat bantu navigasi apung	10 m	10 m	20 m
Fitur topografis	10 m	20 m	20 m

Pengukuran Kedalaman

Kesalahan total dalam pengukuran kedalaman, mengacu pada SP-44 Edisi ke-3, tidak boleh melebihi 0.3 m untuk kedalaman kurang dari 30 m atau 1% dari kedalaman untuk kedalaman yang lebih dari 30 m, dengan tingkat kepercayaan 90%. Ini tidak termasuk kesalahan yang berkaitan dengan pengukuran pasut, penentuan datum kedalaman dan transfer datum kedalaman dari lokasi pengamatan pasut (palem atau *tide gauge*). Kombinasi kesalahan-kesalahan yang berhubungan dengan pasut tidak boleh melebihi kesalahan yang diizinkan untuk pengukuran kedalaman. Sedangkan konsep atau hal baru yang dimasukkan dalam SP-44 Edisi ke-4 terdiri dari:

(1) Peningkatan tingkat kepercayaan dari 90% menjadi 95% agar dapat digunakan untuk pengukuran-pengukuran dalam survei yang lebih luas.

(2) Standar ketelitian kedalaman terbagi menjadi kesalahan yang bersifat tetap (*fixed error*) dan kesalahan yang bergantung pada kedalaman yang bervariasi untuk masing-masing orde survei.

(3) Kesalahan-kesalahan pengamatan pasut, penentuan datum dan transfer datum kedalaman telah termasuk dalam penentuan ketelitian kedalaman secara keseluruhan.

Realisasi dari ketiga hal di atas, maka dalam SP-44 Edisi ke-4, batas-batas kesalahan (σ) untuk ketelitian kedalaman dihitung menggunakan:

$$\sigma = \pm\sqrt{a^2 + (bd)^2} \qquad \text{(D.1)}$$

dengan a = kesalahan kedalaman independen (jumlah kesalahan yang bersifat tetap), b = faktor kesalahan kedalaman yang dependen, d = kedalaman dan bd = kesalahan kedalaman yang dependen (jumlah semua kesalahan kedalaman yang dependen). Nilai a dan b untuk masing-masing orde survei ditentukan berdasarkan Tabel D.4.

Tabel D.4 Standar ketelitian pengukuran kedalaman

ORDE	Spesial	1	2	3
KETELITIAN KEDALAMAN	a = 0.25 m b = 0.0075	a = 0.5m b = 0.013	a = 1.0m b = 0.023	a = 1.0m b = 0.023

Kerapatan Data dan Deteksi Fitur Bawah Laut

Untuk mengantisipasi tuntutan akan kerapatan data yang dibutuhkan untuk penyelidikan bawah laut, terutama yang berpotensi membahayakan pelayaran, maka standar tentang hal ini disediakan pada standar survei hidrografi Edisi ke-4. Pada edisi sebelumnya, lebar lajur survei (berkaitan dengan daerah cakupan dasar laut) didasarkan pada skala survei, yaitu tidak boleh melebihi satu sentimeter pada skala survei dan interval titik kedalaman tidak boleh melebihi 4 hingga 6 cm pada skala survei kecuali pada daerah yang relatif datar atau dasar laut yang beraturan. Pendekatan yang lebih ilmiah dilakukan oleh IHO sejalan dengan perkembangan kemampuan komputer pengolah data serta kemajuan teknologi *side scan sonar* dan *multibeam sonar* yang telah dicapai.

Realisasi dari konsep baru tersebut adalah dengan penentuan kedalaman dasar laut terbaik yang disebut model batimetrik dengan metode interpolasi kedalaman hasil pengukuran. Data survei yang dapat diterima atau ditolak, dinilai dengan membandingkan model kesalahan yang dihasilkan dengan nilai yang didasarkan pada Persamaan D.1 untuk ketelitian kedalaman dengan nilai a dan b seperti yang ditunjukkan pada Tabel D.5. Jika melebihi standar yang diberikan, maka titik-titik kedalaman harus lebih dirapatkan.

Tabel D.5 Standar kerapatan data, deteksi fitur bawah laut, lebar lajur maksimum dan ketelitian model batimetrik

ORDE	Spesial	1	2	3
CAKUPAN DASAR LAUT 100%	Wajib	Diperlukan pada daerah tertentu	Mungkin diperlukan pada daerah tertentu	Tidak digunakan
KEMAMPUAN DETEKSI SISTEM	*Cubic features* >1m	*Cubic features* >2m pada kedalaman hingga 40m; 10%*d* jika lebih dari 40m	Sama dengan Orde 1	Tidak digunakan
LEBAR LAJUR MAKSIMUM	Tidak digunakan	3× kedalaman rata-rata atau 25m	3-4× kedalaman rata-rata atau 200m	4× kedalaman rata-rata
KETELITIAN MODEL BATIMETRIK (TINGKAT KEPERCAYAAN 95%)	Tidak digunakan	a = 1.0m b = 0.026	a = 2.0m b = 0.05m	a = 5.0m b = 0.05m

Berkaitan dengan lebar lajur survei pada edisi-edisi sebelumnya, bergantung pada skala survei, sedangkan pada standar yang baru bergantung pada kedalaman rata-rata perairan (lihat: Tabel D.5). Pengecualian berlaku untuk Orde Spesial yang menggunakan cakupan dasar laut 100%. Pembesaran lebar lajur survei dapat saja dilakukan, jika prosedur-prosedur yang ada telah dipenuhi sehingga menjamin deteksi bahaya secara baik. Sistem-sistem *sonar* yang digunakan untuk masing-masing orde survei harus mampu mendeteksi fitur bawah laut, sesuai dengan standar yang diberikan.

Lain-lain

Dalam standar survei yang baru, persyaratan yang berkaitan dengan pengukuran tinggi (pengamatan) pasut juga telah ditetapkan. Kesalahan pengukuran total tidak boleh melebihi ± 5 cm pada tingkat kepercayaan 95% untuk Orde Spesial dan ± 10 cm untuk orde survei lainnya. Kesalahan pengukuran tinggi pasut ditambah dengan kesalahan pada proses penentuan

datum kedalaman dan transfer datum dari stasiun pengamatan pasut ke daerah survei harus dikombinasikan dengan kesalahan pengukuran kedalaman untuk penentuan ketelitian titik-titik kedalaman.

Beberapa pengukuran lainnya, seperti pengambilan sampel bawah laut dan pengamatan arus laut juga masih dicantumkan dalam SP-44 Edisi ke-4. Pengambilan sampel bawah laut dimaksudkan untuk menentukan kondisi dasar laut (dapat juga disimpulkan dari berbagai sensor, seperti: *echosounder*, *side scan sonar* atau *sub-bottom profiler*). Kondisi dasar laut ini diperlukan antara lain untuk penentuan lokasi penjangkaran kapal. Pada kondisi normal, pengambilan sampel tidak diperlukan pada daerah dengan kedalaman lebih dari 200 m. Jarak antar sampel umumnya 10 kali dari lebar jalur survei yang terpilih. Untuk penentuan daerah lokasi penjangkaran, jarak antar sampel dapat semakin dirapatkan. Sedangkan pengamatan arus laut biasanya dilakukan pada daerah sekitar pelabuhan dan terusan, terutama jika kecepatan arus melebihi 0.5 knot. Secara umum, pengamatan arus sebaiknya dilakukan sepanjang mereka dapat membawa pengaruh terhadap navigasi permukaan. Lamanya pengamatan tidak kurang dari 15 hari (dapat mencapai 29 hari) dengan interval minimal satu jam.

Agar dapat dilakukan pengkajian secara komprehensif terhadap kualitas data survei, diperlukan dokumen untuk memfasilitasi penggunaan data tersebut untuk berbagai keperluan pengguna. Semua informasi yang berkaitan dengan kualitas data (*metadata*) hendaknya tidak hanya berkaitan dengan kapal survei, daerah, tanggal dan peralatan yang digunakan, tetapi juga tentang prosedur-prosedur kalibrasi, penentuan kecepatan gelombang akustik dan metode-metode reduksi pasut. Estimasi tentang ketelitian data yang berkaitan dengan tingkat kepercayaan sebaiknya juga dimasukkan.

Referensi

International Hydrographic Organization, (1998). *IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication Number 44, 4th Edition*. International Hydrographic Bureau - IHB, Monaco.

Monahan, D. & Wells, D. (2000). *IHO SP 44 Standards for Hydrographic Surveys and the Demands of the New Century*, Ocean Mapping Group, UNB, Canada.

Pustaka

Djunarsjah, E. (2001). *Standar Survei (Baru) dalam Survei Hidrografi (SP – 44 IHO Edisi ke-4 Tahun 1998)*. Forum Ilmiah Tahunan ISI. Surabaya.

Federal Geographic Data Committee (2000). *Geospatial Positioning Accuracy Standards*. Subcommittee on Marine and Coastal Spatial Data, Federal Geographic Data Committee. Virginia, USA.

Janhidros TNI-AL (1983). *Standar Ketelitian Survey Hidrografi*, Jawatan Hidro-oseanografi TNI-AL. Jakarta.

Mills, J. (1998). *New International Standards for Hydrographic Adopted*. Newsletter Seahorse. The Hydrographic Society of America, Vol. VII No.4. Rockville, USA.

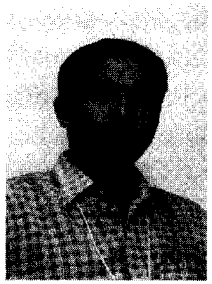
Thomson, D.B., Wells, D. & Falkenberg, W. H. (1981). *An Introduction to Hydrographic Surveying*. Lecture Notes No. 53. University of New Brunswick, Canada.

Penulis

Dr. *der Nat.* Poerbandono, S.T., M.M.

Poerbandono menyelesaikan riset doktoral tentang pengukuran dan pemodelan arus dan angkutan sedimen di Departemen Ilmu-ilmu Kebumian, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Kiel, Jerman 1999 - 2003. Sejak diangkat menjadi dosen di Kelompok Keahlian (KK) Hidrografi, Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (FTSP) - Institut Teknologi Bandung (ITB) 1997, ia mulai tertarik dengan kajian dinamika fisik kawasan pesisir, angkutan sedimen dan instrumen akustik bawah air. Publikasi-publikasinya di konferensi dan *workshop* ilmiah internasional dalam 3 tahun terakhir, seperti: *International Conference on Coastal Engineering, Coastal Sediment, ADCP Users Workshop, FIG* dan *IEEE Working Conference on Current Measurement Technology*, bertopik pengukuran dan pemodelan angkutan sedimen serta penggunaan instrumen akustik untuk pendugaan kandungan dan laju angkutan sedimen. Poerbandono adalah dosen di Departemen Teknik Geodesi ITB yang bertugas mengajar mata kuliah Hidrografi, Angkutan Sedimen dan Dinamika Pesisir pada program sarjana dan mata kuliah Dinamika Pesisir pada program magister. Tahun ini hingga dua tahun mendatang ia diminta sebagai *post-doctorate research fellow* di Universitas Kiel, Jerman untuk menjalankan penelitian tentang pengukuran dan pemodelan dinamika badan air dan sedimen di perairan tropis serta beberapa tugas akademik lainnya dalam rangka kerjasama penelitian dan pendidikan antara ITB dan Universitas Kiel, Jerman. Lahir di Jember, 25 Januari 1970. Menamatkan Sekolah Dasar (SD), Sekolah Menengah Pertama (SMP) dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di kota yang sama. Menikah dengan Salsalia Anggaraswati sejak 1999 dan sejak 2000 dikaruniai satu anak laki-laki.

Penulis



Ir. Eka Djunarsjah, M.T.

Eka Djunarsjah adalah Magister Teknik alumni Departemen Teknik Geodesi FTSP - ITB tahun 1996 dan kandidat doktor dalam bidang teknik geodesi dan geomatika di departemen yang sama. Ia menaruh minat pada pengembangan peta laut elektronik, teori navigasi laut dan spektrum implementasi Aspek-aspek Geodetik Hukum Laut (*Geodetic Aspects of the Law of the Sea*-GALOS) – yang menjadi tema riset doktoralnya. Diangkat menjadi dosen di KK Hidrografi, Departemen Teknik Geodesi FTSP – ITB tahun 1994 dan banyak terlibat dalam kegiatan nasional yang berkaitan dengan kajian pemetaan pesisir dan laut serta penetapan batas wilayah di laut. Telah menghasilkan beberapa diktat kuliah tentang hidrografi dan Aspek Teknik Hukum Laut untuk Departemen Teknik Geodesi FTSP - ITB. Di Departemen Teknik Geodesi ITB, saat ini Eka Djunarsjah aktif mengajar mata kuliah Hidrografi, Aspek Teknis Hukum Laut dan Sistem Pendukung Keputusan pada program sarjana dan mata kuliah Batimetri dan Penentuan Posisi pada program magister. Selain itu, ia pun adalah dosen di Sekolah Tinggi Teknologi Angkatan Laut (STTAL) yang bertugas mengajar mata kuliah Survei dan Penentuan Posisi Kelautan. Beberapa penelitian yang pernah dilakukannya antara lain: Pemetaan Batas Propinsi Laut dalam Perspektif UU No. 22 tentang Pemerintahan Daerah, Kajian Batas Laut Indonesia dan Timor Leste, Kajian Implementasi Kadaster Kelautan di Indonesia, Kajian Batas Maritim Indonesia dan Negara Tetangga, Kajian Datum Maritim Batas Laut Indonesia dan Negara Tetangga dan Model Prediksi LAT untuk Penetapan Batas Laut di Perairan Indonesia. Lahir di Curup, 27 Juli 1967 dan menyelesaikan SD di kota yang sama, menamatkan SMP hingga SMA di Bandung. Tahun 1996 menikah dengan Laksmi dan dikaruniai satu anak perempuan yang lahir tahun 1997.

Kontributor

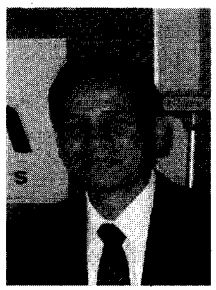
Ir. Samsul Bachri, M.Eng., Ph.D.

Setelah menamatkan program magister di Universitas New Brunswick dengan topik tesis penentuan posisi horisontal di laut dengan gelombang radio, Samsul Bachri menyelesaikan penelitian doktoral di Universitas Curtin, Australia pada tahun 1999 dengan topik disertasi tentang deteksi perubahan daerah aliran sungai dengan penginderaan jauh dan sejak 2003 menjabat Ketua KK Hidrografi. Telah menjadi akademisi di KK Hidrografi, Departemen Teknik Geodesi FTSP – ITB sejak tahun 1979 dan telah berkontribusi pada Forum Ilmiah Tahunan Ikatan Surveyor Indonesia dan beberapa konferensi GALOS. Meminati Sistem Informasi Geografi dan aplikasi data penginderaan jauh untuk hidrografi pesisir dan perairan pedalaman. Lahir di Bandung, 28 Maret 1954 dan menyelesaikan pendidikan dasar dan menengah di kota yang sama. Tahun 1985 menikah dengan Lina Herlina dan dikaruniai seorang anak perempuan (1985) dan dua anak laki-laki (1988 dan 2002).

Ir. Hasanuddin Zainal Abidin, M.Sc., Ph.D.

Hasanuddin Z. Abidin menyelesaikan penelitian doktoral di Departemen Teknik Geodesi dan Geomatika, Universitas New Brunswick, Kanada pada tahun 1992 dengan topik disertasi tentang aspek-aspek geometrik dan komputasi pemecahan *ambiguity* secara *on-the-fly* pada pengamatan sinyal *Global Positining System* (GPS). Sejak tahun 1986 menjadi akademisi di KK Geodesi, Departemen Teknik Geodesi FTSP – ITB dan telah banyak mempublikasikan hasil-hasil penelitiannya pada jurnal-jurnal dan konferensi

ilmiah internasional dan nasional serta telah pula menulis beberapa buku teks. Meminati aplikasi GPS untuk berbagai aplikasi perencanaan dan industri, mitigasi bencana dan vulkanologi. Pernah menerima beberapa penghargaan nasional dan internasional sebagai dosen dan peneliti teladan. Lahir di Jakarta, 8 Agustus 1960 serta menyelesaikan SD di Jakarta dan Aceh serta SMP dan SMA di Jakarta. Menikah dengan Budi Mulyanti (1985) dan dikaruniai anak perempuan (1986) serta tiga anak laki-laki (dua di antaranya tahun 1990 dan 1995).



Ir. Irdam Adil, M.T.

Irdam Adil adalah Magister Teknik dari Program Studi Geofisika Terapan, Fakultas Ilmu Kebumian dan Teknologi Mineral - ITB 1994 dan saat ini merupakan akademisi di KK Hidrografi, Departemen Teknik Geodesi FTSP - ITB yang paling berpengalaman dalam hidrografi praktis. Sejak menjadi dosen ITB 1984 hingga kini, ia menaruh perhatian besar pada instrumentasi dan otomatisasi akuisisi dan transmisi data batimetri serta telah banyak terlibat dalam berbagai kegiatan survei hidrografi untuk perencanaan wilayah perairan dan eksplorasi lepas pantai. Pengetahuan hidrografinya diperkuat saat menjalani pendidikan lanjutan di Universitas New Brunswick, Kanada 1989-1990. Kelahiran Jakarta, 21 September 1952 dan di kota yang sama pula menyelesaikan SD hingga SMA. Menikah dengan Neny Widya sejak 1983 dan dikaruniai dua anak laki-laki (1984 dan 1990) dan seorang anak perempuan (1998).